



TITLE:

岩盤地下水中の汚染物質の環境への影響評価手法に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

安藤, 賢一

CITATION:

安藤, 賢一. 岩盤地下水中の汚染物質の環境への影響評価手法に関する研究. 京都大学, 2003, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2003-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k10186>

RIGHT:

岩盤地下水中の汚染物質の環境への
影響評価手法に関する研究

平成15年1月

安 藤 賢 一

岩盤地下水中の汚染物質の環境への
影響評価手法に関する研究

平成15年1月

安 藤 賢 一

目 次

	頁
第1章 序論	1
1.1 本研究の目的	1
1.2 本論文の構成	2
第2章 原位置調査と評価の連関.....	4
2.1 概要	4
2.2 調査の目的と調査の対象となるスケールの想定.....	4
2.3 地質情報を取得するための調査方法.....	7
2.4 地下水流動および物質移行評価モデルに必要な情報の抽出.....	8
2.4.1 評価モデルの分類.....	8
2.4.2 評価モデルに応じた情報の抽出.....	9
2.5 調査方法から必要な情報を得るまでのフローの構築.....	12
2.6 透水係数測定と地下水流動評価の連関についての例示.....	15
2.6.1 概要	15
2.6.2 確率密度分布からの必要透水試験数の検討.....	17
2.6.3 モンテカルロ法による必要透水試験数の検討.....	19
2.6.4 ランダム水理場における平均透水係数の検討.....	21
2.7 まとめ	27
第3章 確率論を用いた物質移行場の連続体的アプローチ.....	28
3.1 概要	28
3.2 既存の研究	28
3.3 原位置データの概要.....	29
3.4 境界条件としての水頭の推定.....	34
3.4.1 水頭の特徴.....	34
3.4.2 原位置データへの展開.....	35
3.4.3 原位置データによる地下水流動および物質移行解析のための水頭の推定....	36
3.5 透水係数の確率論的アプローチ.....	39
3.5.1 透水係数の特徴.....	39
3.5.2 原位置データへの展開.....	39
3.5.3 水理場のリアリゼーション.....	43
3.6 地下水流動解析.....	48
3.6.1 解析条件	48
3.6.2 地下水流動解析結果.....	52

3.7 物質移行解析	58
3.7.1 物質移行に用いる水理場の選定.....	58
3.7.2 物質移行解析.....	58
3.7.3 物質移行パラメータの同定.....	59
3.7.4 物質移行解析結果と原位置データの比較.....	60
3.8 まとめ	63
第4章 亀裂性岩盤における物質移行特性の確率論的評価.....	66
4.1 概要	66
4.2 割れ目のモデル化の基礎式.....	69
4.3 地下水流動評価.....	71
4.4 物質移行評価	73
4.4.1 非吸着性トレーサの移行挙動評価.....	73
4.5 原位置計測データの評価.....	78
4.5.1 パイプモデルにおけるパイプ半径と透水量係数との関係.....	78
4.5.2 平行平板モデルにおける開口幅と透水量係数との関係.....	79
4.6 感度解析	81
4.6.1 感度解析に用いるパラメータの設定.....	81
4.6.2 感度解析結果.....	81
4.7 原位置データを用いた整合性評価.....	88
4.8 まとめ	88
第5章 人工構造物及びその周辺岩盤の物質移行（ガス）に関する実験的評価.....	90
5.1 概要	90
5.1.1 研究目的	92
5.1.2 試験構成	93
5.2 原位置試験	96
5.2.1 アクセス坑道とサイロ空洞の掘削.....	96
5.2.2 天然バリア（岩盤）に関する試験.....	97
5.2.3 人工バリアの建設.....	116
5.2.4 人工飽和	122
5.3 室内試験	122
5.3.1 試験概要	122
5.3.2 力学連成二相流データ取得試験.....	125
5.4 ガス移行挙動評価解析.....	128
5.4.1 ガス移行挙動概念.....	128
5.4.2 数種の解析の比較と問題点の整理.....	128
5.4.3 本試験の計画立案および見直しのための解析.....	129

5.5 まとめ	132
第6章 今後の展開	134
6.1 調査・評価のデータフローダイアグラム.....	134
6.2 確率論を用いた物質移行場の連続体的アプローチ.....	134
6.3 亀裂性岩盤における物質移行特性評価.....	134
6.4 人工構造物及びその周辺岩盤の物質移行（ガス）に関する実験的評価.....	135
第7章 まとめ	138

図 目 次

	頁
Figure 2.1 想定した中領域.....	5
Figure 2.2 想定した狭領域.....	6
Figure 2.3 連続体モデル.....	11
Figure 2.4 割れ目ネットワークモデル.....	11
Figure 2.5 データフローダイアグラム.....	13
Figure 2.6 評価とリンクした調査概念.....	14
Figure 2.7 第 2.6 節の検討の流れ.....	15
Figure 2.8 仮想的な水理場.....	17
Figure 2.9 透水試験数と信頼度の関係.....	18
Figure 2.10 サンプルデータのばらつき (n: ボーリング本数)	20
Figure 2.11 簡易浸透流モデル (両端水頭差固定: 0.01m/m、両側不透水境界、領域 1m×1m)	22
Figure 2.12 模擬検討用水理場.....	25
Figure 2.13 ケース 1: 流行に平行方向にメッシュ数を増やした解析例.....	26
Figure 2.14 ケース 2: 流行に直交方向にメッシュ数を増やした解析例.....	26
Figure 2.15 20 リアリゼーションの平均値.....	26
Figure 3.1 調査坑道およびボーリング孔のレイアウト (Cacas 他より, 1990a) ..	32
Figure 3.2 調査坑道への湧水量の経時変化とトレーサー試験の実施時期の関係..	32
Figure 3.3 トレーサー注入区間と調査坑道での計測位置 (Cacas 他より, 1990a).....	33
Figure 3.4 移流拡散解析用の 3 次元ネットワークモデル (Cacas 他より, 1990a).....	33
Figure 3.5 圧力水頭のサンプルバリオグラム.....	37
Figure 3.6 圧力水頭の一次残差サンプルバリオグラム.....	37
Figure 3.7 圧力水頭の二次残差サンプルバリオグラム.....	38
Figure 3.8 圧力水頭の三次残差サンプルバリオグラム.....	38
Figure 3.9 調査坑道からの距離と透水係数の対数値の関係.....	41
Figure 3.10 2.5m パッカー試験による透水係数の対数値の累積分布	41
Figure 3.11 インディケータ 3 段階により正規化された透水係数の対数値 $Y = \ln K$ の全方向インディケータバリオグラム	42
Figure 3.12 第 5 インディケータを越える透水係数の確率評価.....	42
Figure 3.13 100 リアリゼーションの水理場の任意の点における平均と分散の収	

束性.....	44
Figure 3.14 2.5m 区間の透水係数と割れ目密度（ボーリング孔における単位長さあたりの割れ目の数）の関係.....	45
Figure 3.15 2 ケースのランダム透水係数場.....	46
Figure 3.16 Figure 3.14 に示す透水係数場の累積分布.....	47
Figure 3.17 2 次関数を用いてトレンド補正した水頭の計測値のサンプルバリオグラムとスフェリカルモデルによる全方向バリオグラム.....	49
Figure 3.18 水頭のクリギング値（上）とその分散による不確実性評価（下）...	50
Figure 3.19 地下水流動モデル.....	51
Figure 3.20 ステージ1 およびステージ2 調査坑道への湧水量の解析結果のヒストグラム（100 リアリゼーション） なお、 ∇ は、計測値.....	54
Figure 3.21 第 48 ケースの条件付シミュレーションにおける地下水流動解析結果の間隙水圧および全水頭（ステージ1）.....	55
Figure 3.22 調査坑道への湧水量の計測値および代表的な解析結果.....	56
Figure 3.23 ステージ1（上）およびステージ2（下）における水頭の計測値と解析結果の比較（第 48 番目の透水係数場）.....	57
Figure 3.24 原位置トレーサー試験と解析結果の比較.....	61
Figure 3.25 トレーサー試験の最大濃度到達時間の解析結果と計測値の比較.....	62
Figure 4.1 花崗岩を対象とした亀裂性岩盤における透水性割れ目の概念モデル（NAGRA, NTB93-22）.....	67
Figure 4.2 割れ目内部の概念モデル（NAGRA, NTB93-26）.....	68
Figure 4.3 パイプモデルの概念.....	70
Figure 4.4 割れ目の直径の4乗の分散（平均は等しい）をパラメータとした物質移行と流動の相関への影響.....	86
Figure 4.5 割れ目の直径の分散（平均は等しい）をパラメータとした物質移行と流動の相関への影響.....	86
Figure 4.6 透水係数の対数における分散とパイプモデルの断面積の比.....	87
Figure 4.7 透水量係数の対数値の分散と透水性から決まる有効間隙率と物質移行から決まる有効間隙率の比.....	87
Figure 5.1 グリムゼル地下試験場.....	91
Figure 5.2 ガス移行挙動試験の原位置試験概念.....	95
Figure 5.3 施工手順.....	95
Figure 5.4 サイロ空洞の地質マップ.....	99
Figure 5.5 試験空洞内のボーリング孔の平面レイアウト.....	106
Figure 5.6 試験空洞内のボーリング孔の断面レイアウト.....	107
Figure 5.7 GMT 98.004 の画像観測（区間 1.9 から 2.3m）.....	108

Figure 5.8	間隙水圧計測から内挿、外挿した地下水圧力分布：解析モデルの境界条件.....	109
Figure 5.9	湧水量測定概念.....	112
Figure 5.10	湧水量測定位置.....	113
Figure 5.11	湧水測定状況.....	114
Figure 5.12	空洞流入量計測値の経時変化.....	115
Figure 5.13	コンクリートサイロ全景.....	116
Figure 5.14	コンクリートサイロ施工状況.....	117
Figure 5.15	充てん材の練り混ぜ状況.....	118
Figure 5.16	充てん剤の締め固め状況（底版）.....	118
Figure 5.17	充てん材締め固め状況（側壁）.....	118
Figure 5.18	締め固め後の高さ確認.....	119
Figure 5.19	砂置換法（JIS A 1214）による原位置密度試験.....	119
Figure 5.20	施工前サンプルの品質確認.....	119
Figure 5.21	施工後の密度（品質確認）計測結果.....	120
Figure 5.22	計測ケーブル用ステンレス管.....	121
Figure 5.23	計測装置の養生状況.....	121
Figure 5.24	走査型電子顕微鏡観察：GMT 充填材締め固め直後（含水比 11%）.....	125
Figure 5.25	水銀圧入間隙測定（→湿潤→乾燥履歴後） 間隙構造変化 透気・透水性の変化.....	126
Figure 5.26	透気係数測定.....	126
Figure 5.27	水分特性曲線（テンシオメーター、サイクロメーター、サクシヨン制御試験）.....	127
Figure 5.28	本試験で想定しているガス移行概念.....	130
Figure 5.29	2 種類のガス移行概念を示す室内試験結果.....	130
Figure 5.30	4 種類のガス移行解析コードによる人工飽和（再冠水）状況の解析結果.....	131
Figure 5.31	TOUGH2 による予測解析と原位置試験との比較.....	131
Figure 6.1	多孔質媒体における流路長のモデル例.....	137
Figure 6.2	透水性とガスブレイクスループレッシャーの関係.....	137

表 目 次

	頁
Table 2.1 網羅的にリストアップされた調査手法.....	7
Table 2.2 評価に必要な情報.....	10
Table 2.3 想定透水係数.....	21
Table 3.1 トレーサー試験の諸元.....	30
Table 3.2 測定位置Aにおけるトレーサー計測データ.....	31
Table 3.3 測定位置Bにおけるトレーサー計測データ.....	31
Table 3.4 測定位置Cにおけるトレーサー計測データ.....	31
Table 3.5 透水係数のインディケータカットオフ値とその値を超えない割合.....	40
Table 3.6 調査坑道への湧水量の統計 (in l/min).....	53
Table 3.7 圧力水頭のクリギング値と地下水流動解析値の差 (m)	53
Table 3.8 圧力水頭の計測値と地下水流動解析値の差 (m)	53
Table 3.9 キャリブレーションした物質移行特性値.....	59
Table 3.10 トレーサー濃度がピークとなる時間の比較.....	60
Table 3.11 トレーサー濃度のピーク値の25%、50%となる時間の比較.....	60
Table 4.1 パイプ1個に対する分散の影響評価.....	83
Table 4.2 パイプ10個に対する分散の影響評価.....	83
Table 4.3 パイプ100個に対する分散の影響評価.....	84
Table 4.4 平行平板1条に対する分散の影響評価.....	84
Table 4.5 平行平板10条に対する分散の影響評価.....	85
Table 4.6 平行平板100条に対する分散の影響評価.....	85
Table 5.1 本試験に協力している機関と協力分野.....	91
Table 5.2 目的および必要事項.....	92
Table 5.3 GMT プロジェクトの主な実施内容と今後の予定	93
Table 5.4 ボーリング孔の位置と方向.....	101
Table 5.5 各ボーリング孔における調査項目.....	102
Table 5.6 ボアホールにおけるフロー・ロギングの結果の要約.....	103
Table 5.7 GMT 99.007 and 99.009 におけるEDZ試験の結果要約	103
Table 5.8 岩盤の透気試験.....	104
Table 5.9 長期透水試験 (GMT 98-001~98-004) の結果.....	105
Table 5.10 吸湿紙を使用した流入率の定量化.....	111
Table 5.11 サイロへの湧水点 (滴下点)	111
Table 5.12 人工バリアの計測センサー一覧.....	121

Table 5.13	室内試験概要総括表 (1/2)	123
Table 5.14	室内試験概要総括表 (2/2)	124
Table 5.15	解析コード一覧.....	128
Table 5.16	解析に使用する水及びガスの特性値 STP ($T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_0=0.1013$ MPa)	129

第1章 序論

1.1 本研究の目的

近年、地下の利用が高まるとともに地球環境への高い関心から地下水汚染や地盤・岩盤の汚染が着目されている。ニッケイコンストラクション（1998）によれば、環境庁による土壌環境、地下水環境基準が設定されている物質を対象に地方自治体が調査したところ現状200以上の土壌汚染が発見されている。

他方、いわゆるゴミと呼ばれる一般廃棄物や産業廃棄物においても処分地選定、処分方法、その後のモニタリング等において様々な問題が生じている。

また、電気のゴミとして、数万年という超長期にわたっての評価を必要とする放射性廃棄物についても深地層への処分が取りざたされている。2001年には、高レベル放射性廃棄物処分を行う実施主体として、原子力発電技術環境整備機構（NUMO）が設立され、現在処分のための概要調査地区の選定に当たっている。特に放射性廃棄物処分の問題では、国民への影響の大きさと関心の高さを考えた場合、求められる安全性は非常に高く、さらにその安全性を数万年～数10万年の長期にわたり評価する必要がある。そのため、処分地のための概要調査段階において調査から得られる情報の詳細性と信頼性が高く求められと同時に調査データの解釈・評価において、困難が予想される。

そうした現状を踏まえ、汚染物質の評価において重要な要素として、

- 現在地中に存在するあるいは処分しようとする汚染物質の量と質の同定、
- 汚染物質の現状の広がりとその速度
- 現状から見た汚染の源やその発生年代の逆算、
- 汚染の拡散について量と方向の将来予測、化学物質の組成や量の変化の予測
- 費用対効果の高い汚染の阻止・除去方法の提案
- 費用対効果の高いモニタリングシステムのネットワークと手法の提案

があげられる。これらの評価の基本となるものが地下水の流動と汚染物質の移流・拡散現象の把握である。

こうした現状を背景に、岩盤地下水の流動と汚染物質の移流・拡散現象の把握手法の高度化を目的として、確率論的なアプローチについて研究を行った。具体的には、地下空間において限定されたボーリング孔やトンネルでの情報から複雑で不均質な岩盤中の地下水の流れに関する基礎的研究を踏まえ、岩盤の水理学的計測データを分析・評価し、地下水の移流・拡散に関する確率論的研究を行った。さらに、原位置での廃棄物の処分システムにおけるガス移行挙動評価実験を行い、処分システムの挙動を実験的に評価すると共に、ガス移行挙動解析の問題点を洗い出し、課題解決のためのアプローチについても示す。

1.2 本論文の構成

Figure 1.1に本論文の全体構成を示す。各章において、以下の検討を行っている。

第2章では、調査で得られる情報と評価に必要な情報を整理し、データフローダイアグラムとして、その連関を設定する。さらに、ボーリング孔による透水係数測定と地下水流動評価について、具体的にその連関を示した。

第3章では、連続体モデルによる地下水流動および物質移行の確率論的評価を行っている。具体的には、地下水の流れを把握することの困難が予想される亀裂性岩盤を対象とし、透水係数の実測値をもとにクリギング手法の一つであるしたモンテカルロ法によるコンディショナルシミュレーションにより、確率論的に等しい（平均、分散の等しい）100ケースのFEMの要素イメージを単位とした高いレゾリューション（分解能）の水理場をモデル化し、さらに水頭についてはトレンドを考慮して2次の残差方程式よりクリギングを用いて境界条件を設定し、地下水流動解析および物質移行解析を行い、原位置試験結果と比較した。

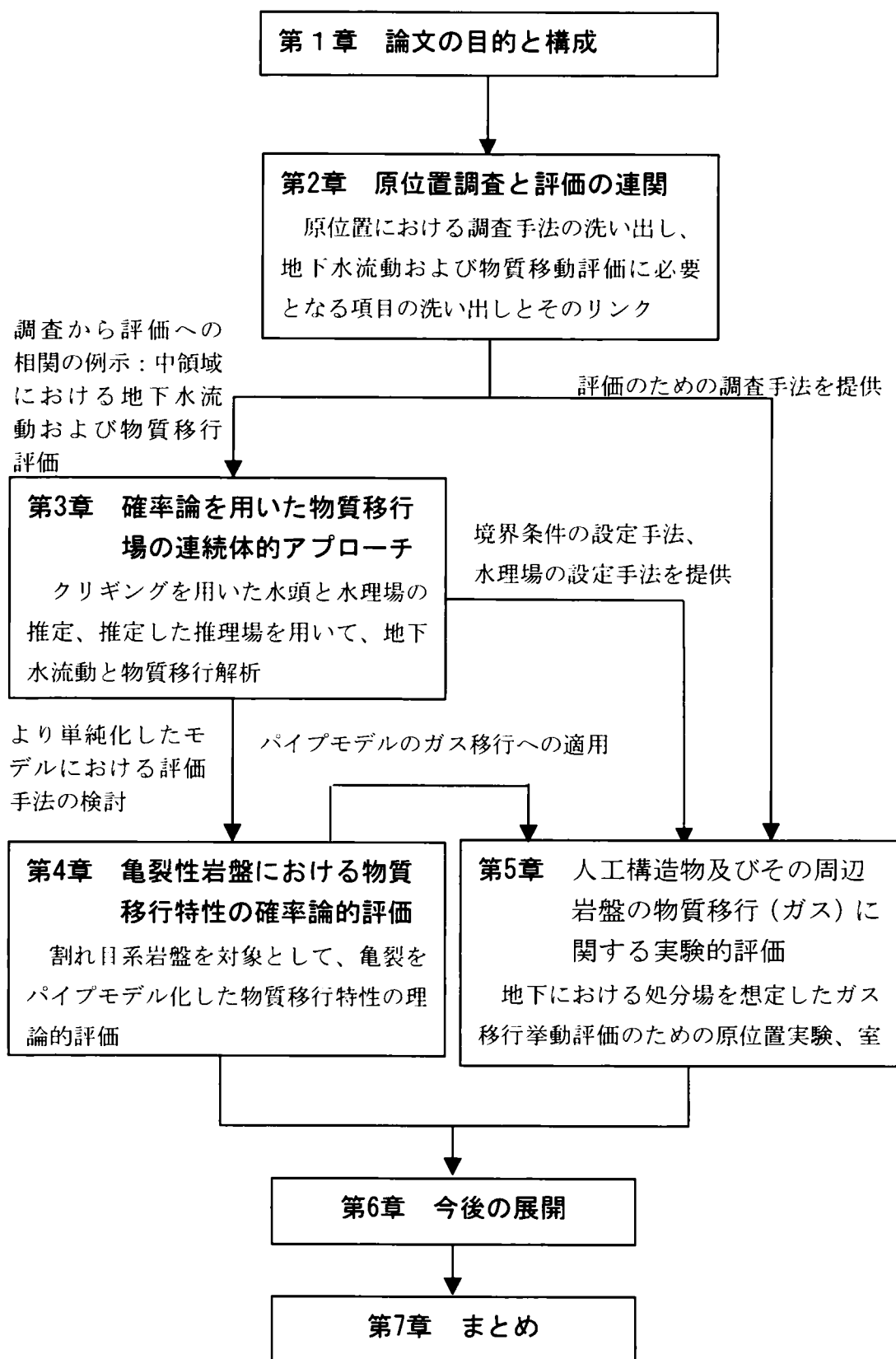
第4章では、サイト特性評価において実施される透水試験やその後に続くトレーサ試験など、一連の原位置試験・調査における整合性評価を確率論的に行う。具体的には、物質移行を評価するための間隙率（地下水量）は、割れ目の大きさや表面の不均質性から透水性から求まる間隙率（並行平板モデルの開口幅あるいはパイプモデルにおけるパイプ半径から求まる）より大きくなることをパイプモデルを用いて単純に透水性から得られる有効間隙率と物質移行から得られる有効間隙率の関係を理論的に示す。原位置試験で得られる透水性に関する情報を中心に、原位置あるいは岩盤のサンプルより得られる透水性に関する情報を基に物質移行の特性について定量的に評価する。

第5章では、揮発性汚染物質のガス化、有機物によるガス発生あるいは還元雰囲気下での金属腐食によって発生したガスは、人工構造物へ悪影響を与える可能性、ガス自体が有害である可能性、ガスによる汚染物質の押し出しの可能性等、廃棄物を封じ込める上で考慮を要する。これらの現象を評価するために、信頼性のあるガスの発生量及び移行挙動の評価手法を構築するために、ガスの移行挙動における多重バリアシステムの評価手法の信頼性を向上させることを目的として、処分場環境と類似した原位置条件下で模擬人工バリアと周辺の岩盤（天然バリア）を含む系でのガス移行挙動試験（Gas Migration Test：以下GMT）を行っている。

第6章では、2章から5章までの総括を行い、今後の展開についての展望を示す。

参考文献

NIKKEI CONSTRUCTION, p34-40, 10.23 1998



第2章 原位置調査と評価の連関

2.1 概要

廃棄物処分の安全性を評価するあるいは汚染物質の広がり进行评估する上で、その地点の地質環境により処分場からの汚染物質の動きを評価することが重要である。そうした地質環境を対象とした調査は、一般的には概略的な調査から詳細調査へと進展していく。地表踏査、物理探査、ボーリング孔による調査、あるいはトレンチ調査により得られたデータを適切に評価し、その段階での情報に基づく安全性を確認するための地下水流動および物質移行評価モデルの構築（モデル化技術）が重要である。

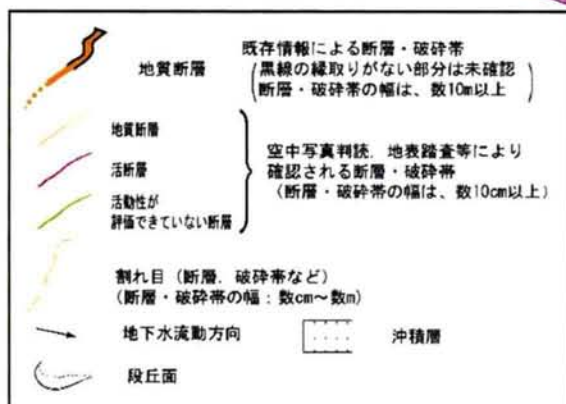
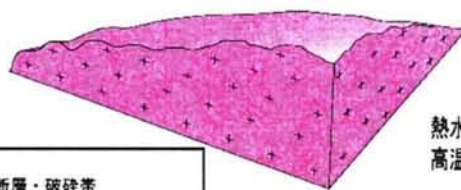
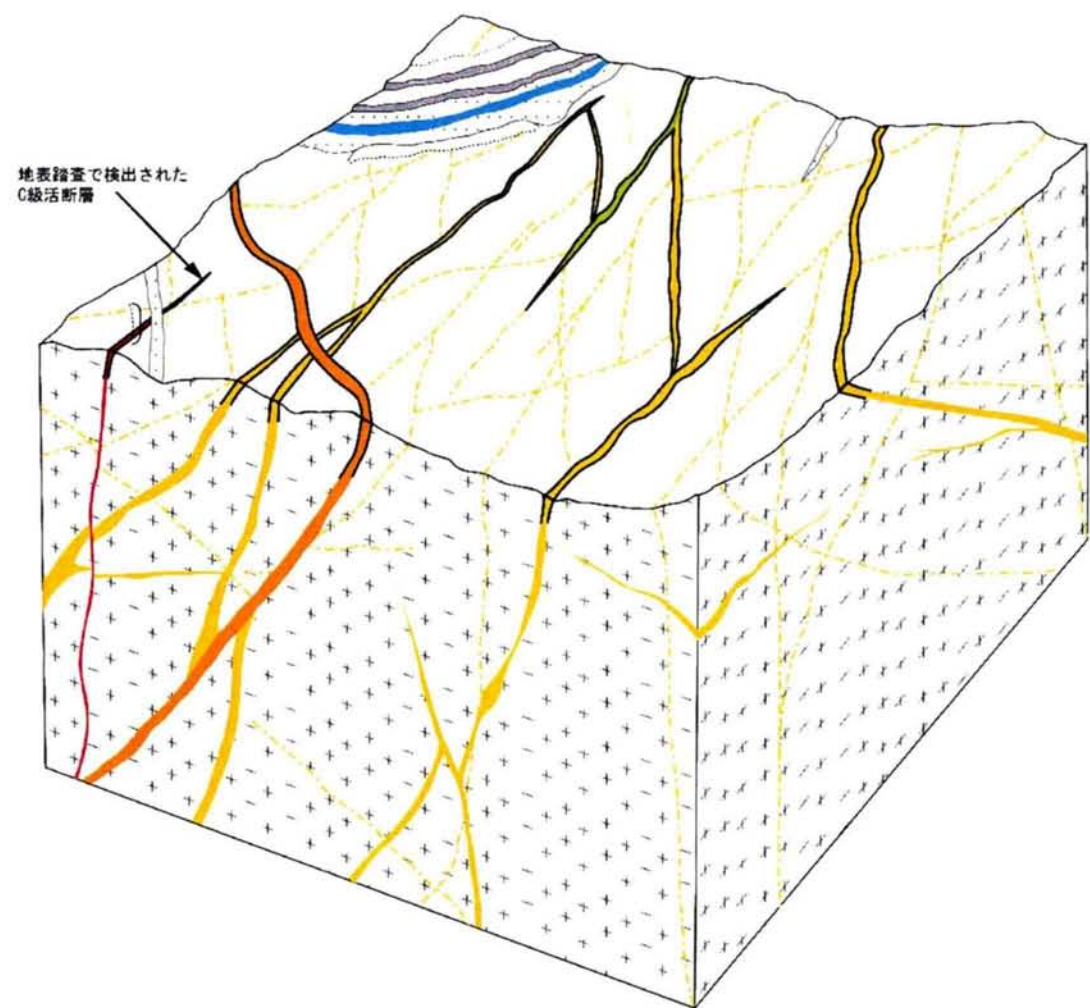
ここでは、①調査の目的と調査の対象となるスケールを設定し、②地質情報を取得するための調査方法を洗い出し、③地下水流動および物質移行評価モデルに必要な情報の抽出を行った。④さらに、調査方法から必要な情報を得るまでのフロー（以下、データフローダイアグラムという）を構築し、一連の調査と調査によって得られる評価のために必要な情報との関係を明らかにし、併せて淡水域・結晶質岩地質環境を対象として調査イメージを作成した。

2.2 調査の目的と調査の対象となるスケールの想定

調査においては、その目的や周辺環境、制約条件により様々な因子を考慮するが、ここでは調査対象領域を大きく以下の2分類に想定する。

② 中領域調査： 中規模なエリアを対象とした調査。目的としては、河川や湧水点や分水嶺等を含み、地下水流動の大きな動きを評価する。適用が考えられる調査手法としては、トレンチ調査、地上からの物理探査、ボーリング調査等が考えられ、地表の一部を改変する調査を含む調査を含めるものとする。

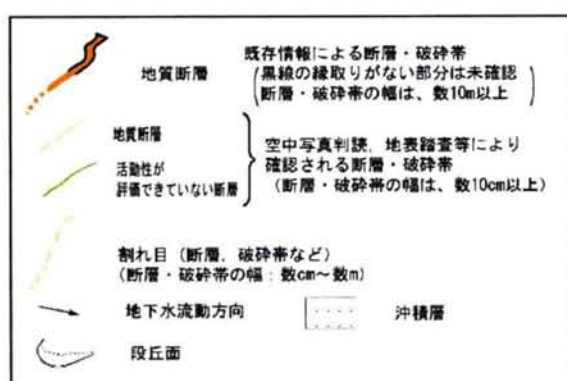
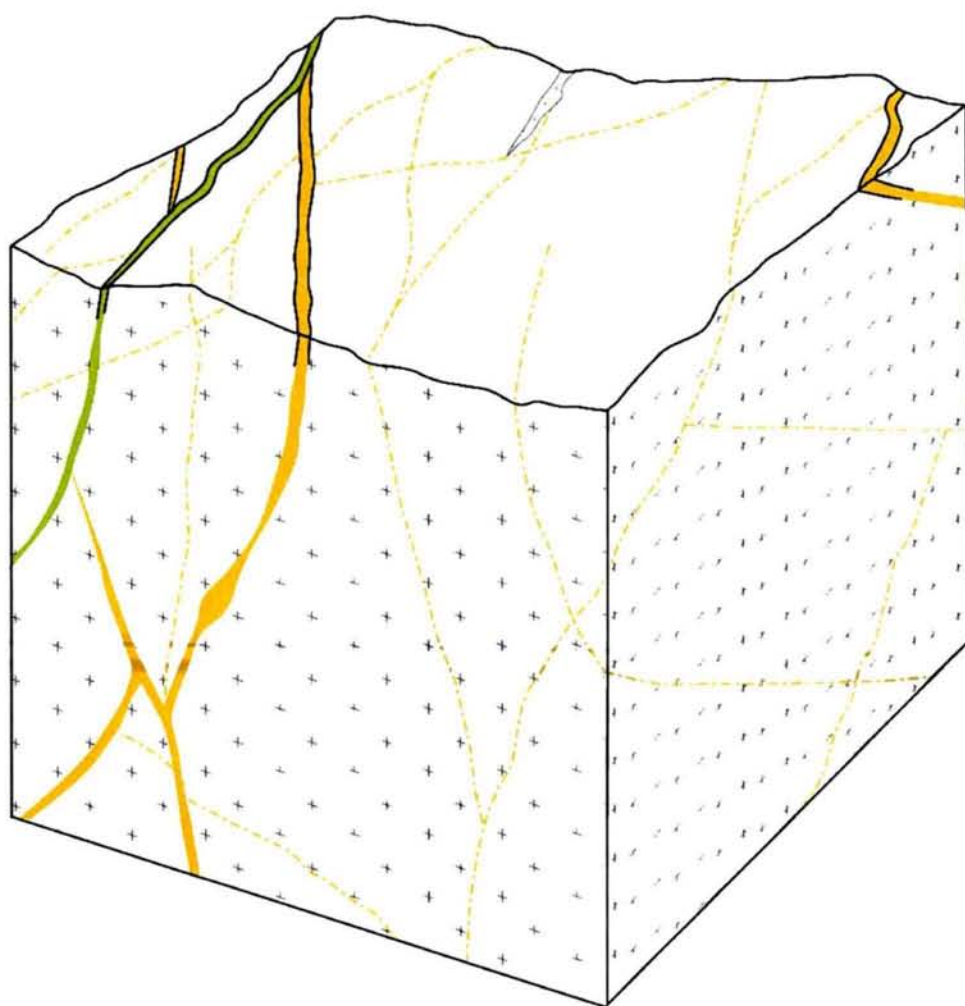
③ 狭領域調査： 主として物質移行評価の観点から、より詳細な情報を取得することを目的とした、中域調査より狭い範囲を対象とした調査。適用する調査手法としては、物理探査やボーリング調査、トレーサー試験、坑道を利用した調査等が考えられる。



熱水活動に関連する
高温深成岩体（分布未確認）

備考
節理等の割れ目及び連続性の悪い破碎帯等は、
図中に表現していない

Figure 2.1 想定した中領域



備考
 節理等の割れ目及び連続性の悪い破砕帯等は、
 図中に表現していない

Figure 2.2 想定した狭領域

2.3 地質情報を取得するための調査方法

サイト特性評価において、原位置で想定される調査手法を Table 2.1 に網羅的に示す。調査手法は、空中や衛星を用いたリモートセンシング、地表踏査、地形測量等の地表調査、ボーリング孔を用いた調査、物理探査に大別され、各々得たい情報とその適用範囲を考慮し選定される。

Table 2.1 網羅的にリストアップされた調査手法

項 目		項 目	
既存情報による調査		物理探査	重力探査
リモートセンシング	衛星画像解析		磁気探査
	空中写真		電気探査
	航空写真測量		電磁探査
地表調査	地形解析		地震探査
	地形測量		放射能探査
	地表地質踏査		単孔式物理探査
	トレンチ調査		孔間物理探査
	地化学調査		
	地表地質調査	室内試験・測定技術	室内物理試験
	水文調査		室内力学試験
	土壌調査		化学試験
ボーリング調査	掘削技術		水質分析・測定
	コア観察		放射年代測定
	孔曲がり測定		地質・鉱物学的分析
	孔壁観察		
	物理検層		
	孔内水平載荷試験		
	初期地圧測定		
	透水試験		
	地下水検層		
	間隙水圧測定		
	地下水位測定		
	地下水採取		

2.4 地下水流動および物質移行評価モデルに必要な情報の抽出

地下水流動評価や物質移行評価に必要な情報は、評価するモデルに依存する。例えば統計的評価を行うためには統計処理が現実的に可能な数のサンプルを必要とし、また割れ目ネットワークモデルに置いては詳細な割れ目情報を必要とするため、まず評価モデルの分類を行った後、その評価方法に応じた情報の抽出を行う。

2.4.1 評価モデルの分類

地下水流動および物質移行の評価モデルとしては、大きく決定論的なアプローチと確率論的アプローチに分類される。また、岩盤の不均質性を考慮する場合、特に割れ目系では、割れ目ネットワークモデルや多孔質不均質モデル等に分類される。

(1) 決定論的アプローチ

水理場を一意的に求める手法として、決定論的構造として地形地質構造および断層・破碎帯などの大きな割れ目構造と岩盤を区分し、両者の水理地質特性を計測から得ることで、モデル化を行う。モデル化に当たっては、断層や破碎帯のモデル化にあたっては、1次元モデルや断層によるネットワークモデルを考え、岩盤部分は、均質な多孔質媒体でモデル化する、あるいは統計的なアプローチによる異方性モデル化する方法などがある。

以下にその代表的なアプローチを示す。

- 古典的な多孔質かつ均質解析によるアプローチ：各地質特性に応じた代表的な透水係数を用いて水理場をモデル化する手法
- 異方性を評価した透水テンソルによるアプローチ：水平・上下等の方向による透水性の違いをテンソルとしてモデル化する手法
- クリギング等による統計解析的アプローチ（例えば齋藤ほか, 2001）：地盤統計学的手法に代表される計測データと計測データの間を距離相関関数によって線形補間し、水理場を構築する手法
- 拡張カルマンフィルターや最小2乗法等による逆解析（例えば奥野ほか, 1993）：透水係数、水頭等のデータを用い、水理場を逆解析により内挿・構築する手法

(2) 確率論的アプローチ

確率論的アプローチは、本来の水理地質構造のもつ不確実性を表現するために、確率論的に均質な場（個々の平均・分散が等しい無数のリアリゼーション）を表現し、地下水流動および物質移行評価を行う。確率論的アプローチには、大きく亀裂性岩盤の割れ目をモデ

ル化する亀裂ネットワークモデルと多孔質岩盤におけるの連続体モデルに分類される。

亀裂性岩盤における岩盤中の支配的な移行経路のモデル化には亀裂ネットワークモデル (Figure 2.4 参照) を、多孔質岩盤における透水性の高い岩石基質部の不均質構造のモデル化には等価連続体モデルなどの統計モデルを適用することとし、亀裂性岩盤および多孔質岩盤に応じてモデル化に必要な幾何学的特性分布および水理特性分布などの情報を取得して母岩の透水構造を把握する。

亀裂性岩盤においては、割れ目の概念から、

- 亀裂ネットワークモデル：複数の割れ目からなる岩盤を亀裂のつながりとして捉え、割れ目の連続性をパイプ等でつなげるモデル
- 平行平板モデル：割れ目を平行な 2 枚の板に挟まれた空間の流れとして捉え、地下水流動を 1 次元的に評価するモデル

等が示されている。

また、等価連続体モデルとしては従来の等方均質モデルに加え、

- モンテカルロシミュレーション的アプローチ：平均・分散を保存したランダム場を複数発生させ、多数の水理場を各個決定論的に解き、個別の答えより確率定数を算出する手法
- 確率有限要素法的アプローチ：浸透流解析における支配方程式に直接、確率論を導入し、解析結果においても平均と分散の形でアウトプットする手法
- フラクタル次元によるアプローチ

があげられる。

2.4.2 評価モデルに応じた情報の抽出

前節で分類したモデル化方法をもとに、決定論的にモデル化する構造と確率論的にモデル化する構造について、それらの幾何学的特性および水理特性などモデル化に必要な情報を抽出する。これは、モデル化する手法に応じて取得する必要のあるデータとその精度が異なるため、調査手法も含めて情報の抽出が重要となる。ここでは、一例として前述のモデルに対して評価に必要な情報としてリストアップを行った (Table 2.2 参照)。亀裂性岩盤中の支配的な移行経路である割れ目が形成するネットワーク構造のモデル化にあたっては、亀裂ネットワークモデルの適用が考えられる。モデル化に必要なデータとして、露頭調査およびボーリング調査などにより得られる割れ目の方向性、大きさ、頻度分布、空間分布などの幾何学的特性と、割れ目の透水量係数などの水理特性に係わる統計データが挙げられ、得られたデータに基づいて確率論的に割れ目を発生させて割れ目ネットワークモデルを構築する (核燃料サイクル開発機構、1999a)。多孔質岩盤中の支配的な移行経路となる岩盤中の不均質透水構造のモデル化には、等価連続体モデル (Figure 2.3 参照)

の適用が考えられ、モデル化にあたってはボーリング孔内の透水試験により得られた透水係数データまたは透水係数と相関のある電気検層から得られた比抵抗値に基づいて、地質統計的な透水係数の空間分布特性を把握し、その分布特性に基づいて不均質な透水構造を構築する等のことが考えられる（例えば、安藤ほか, 1995 や井尻ほか, 1999）。

Table 2.2 評価に必要な情報

構造	特性	亀裂性岩盤	多孔質岩盤
母岩	構造特性	割れ目特性 ・ 方向分布 ・ 形状 ・ 大きさ分布 ・ 頻度分布 ・ 空間分布	不均質透水構造 ・ セミバリオグラム ・ 相関長 （地球統計学的パラメータ）
	水理・物質移行特性	割れ目特性 ・ 透水量係数分布 ・ 開口幅分布 ・ マトリクス拡散寄与面積率 ・ マトリクス拡散深さ 岩石基質特性 ・ 有効間隙率 物質移行特性 ・ 分散長	岩石基質特性 ・ 透水量係数 ・ 有効間隙率 ・ 乾燥密度 ・ 実効拡散係数 ・ 分配係数 物質移行特性 ・ 分散長

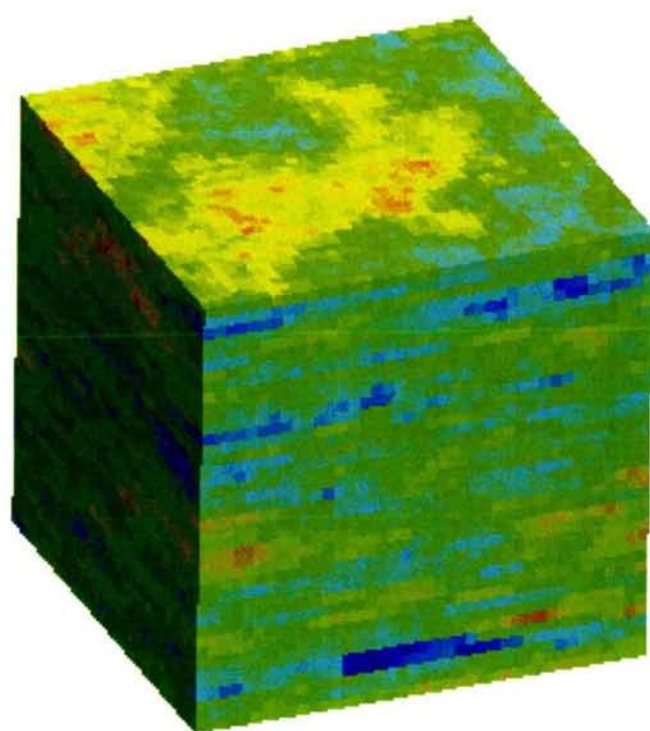


Figure 2.3 連続体モデル

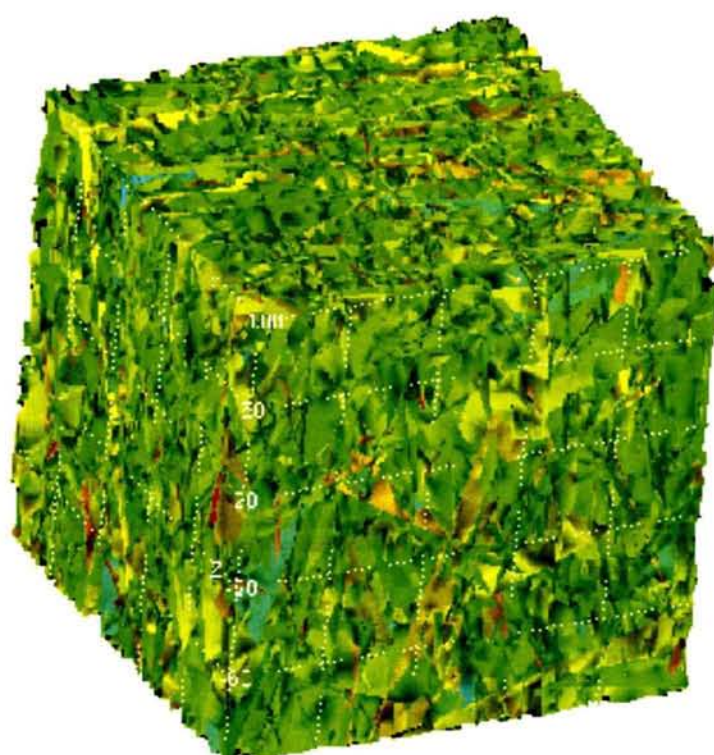


Figure 2.4 割れ目ネットワークモデル

2.5 調査方法から必要な情報を得るまでのフローの構築

前述のように調査段階で得られる情報は、評価するために必要な情報となるまでにさまざまな解釈評価が行われる。そこで、調査手法の整理および地下水流動および物質移行に必要な情報の整理を基に相互間のリンクを Figure 2.5 に示すようなデータフローダイアグラムとして構築した。このフローダイアグラムは、主として本研究の各章のいい付けを舞い核にすることを目的として構築したものであり、対象となる岩種や地質環境、さらには調査の密度や段階、評価の重要度、求められる信頼性に応じて修正、改良がなされる。

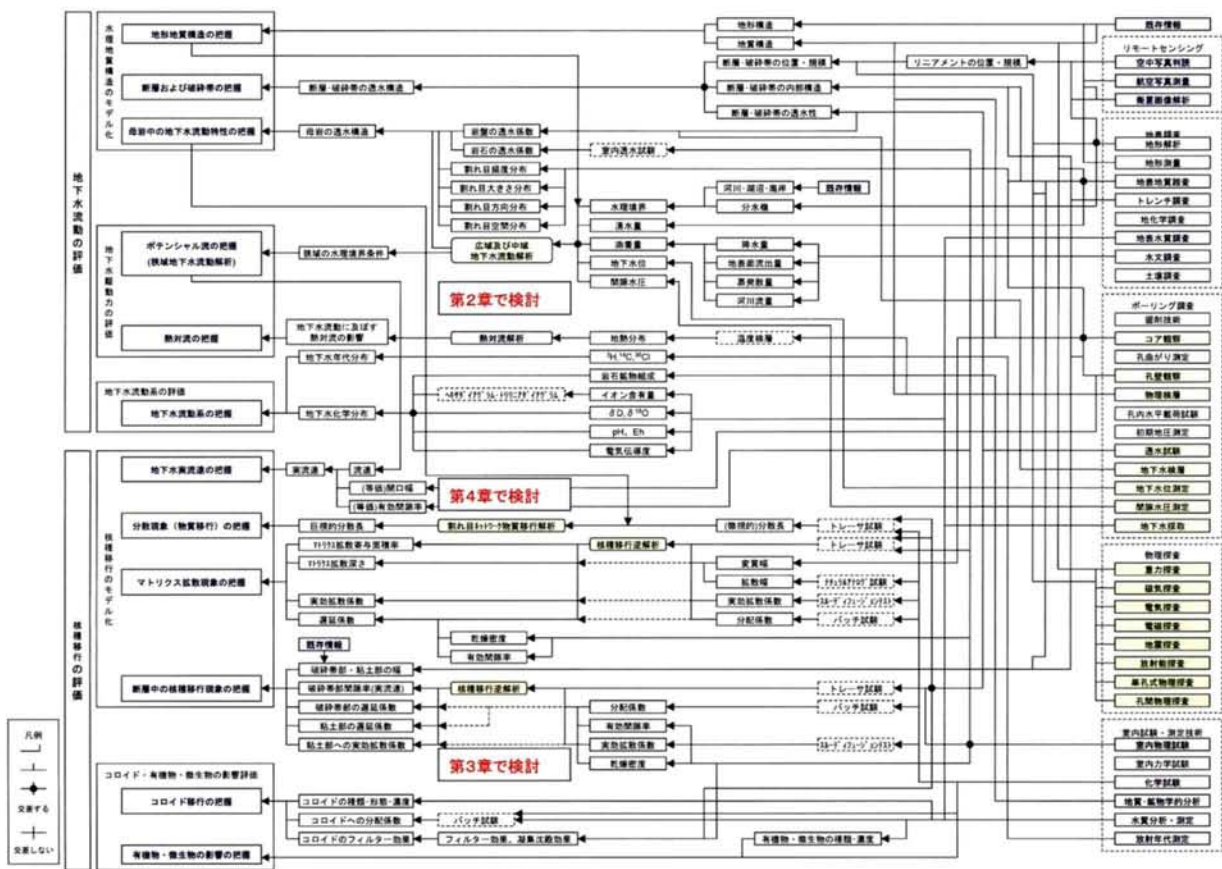


Figure 2.5 データフローダイアグラム

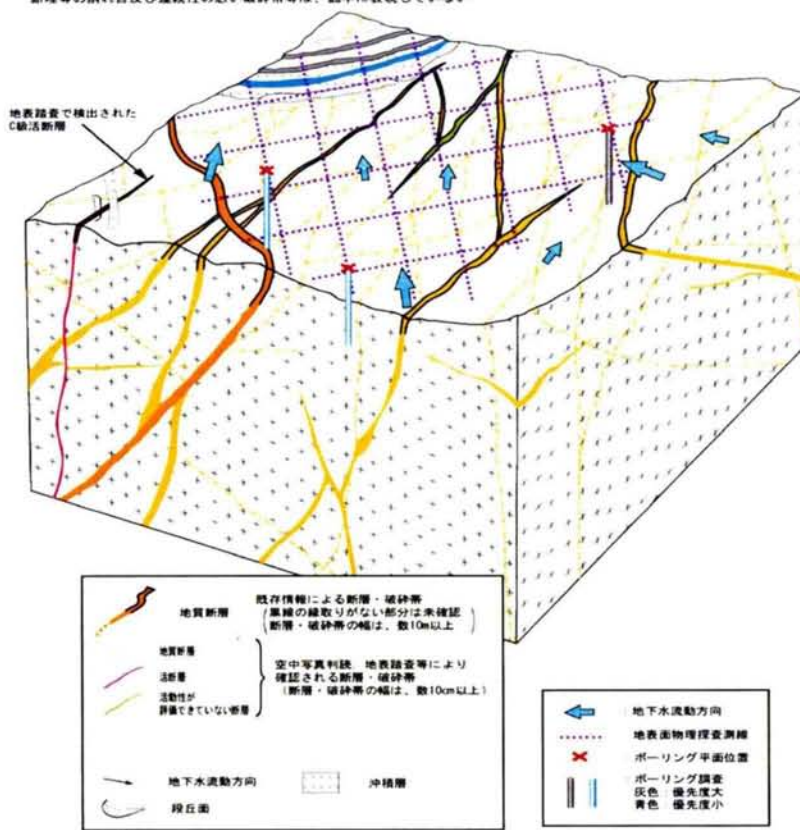
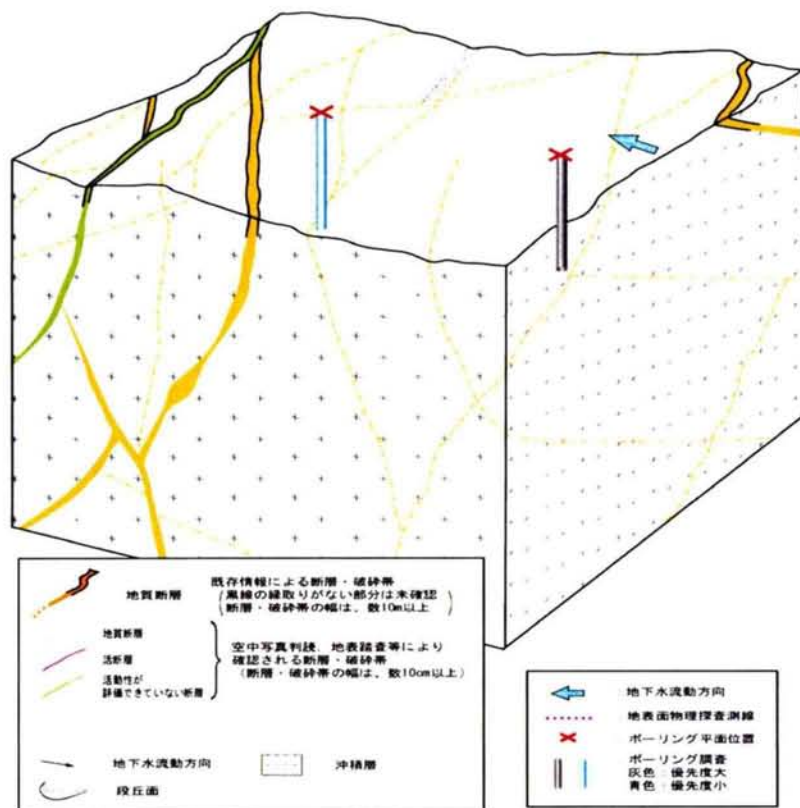


Figure 2.6 評価とリンクした調査概念

2.6 透水係数測定と地下水流動評価の連関についての例示

2.6.1 概要

2.4.2 節で示したように地下水流動評価において必要となる代表的な原位置データとして、透水係数および水頭が挙げられる。これらのデータは、2.3 節の調査方法で示す原位置調査によって得られ、原位置のデータを基に必要とする地下水流動場を評価しうる概念を構築し、モデル化・解析を行い、評価を実施する。

調査において、3次元空間を評価することのできるボーリング孔の本数と範囲を設定することは、非常に重要なことである。特にボーリング孔を利用した透水試験を行う場合などボーリング数や透水試験数等が、コストや作業時間に直接関係する。設定された調査エリアの中で、何カ所のボーリングを行い、調査を行えば最低限の情報が得られるのかは、当然サイトにおける既存情報、地質条件、地形等を考慮した上で設定される。その際、何を持って最低限必要な情報が得られるか、判断することも重要である。

モデル化・解析においては、得られた透水係数や水頭をどう評価してモデル化に反映するかが重要となる。透水係数は、ボーリング孔で得られたデータが全体を代表しうるのか、また得られた個々の数字をどう判断・加工してモデルに組み込むのかも重要な課題となる。

そこで、本節では仮想的な水理場を想定し、①原位置の水理場を評価することのできる透水試験数をまず理論的に検討し、②次にモンテカルロシミュレーションにより仮想水理場に対して模擬ボーリングを行い、得られた透水係数が仮想水理場を代表しうるものかどうか検討する。さらに、③地下水流動評価として、得られた透水データをいかに扱うかについて、具体的に、③想定水理場を対象に流動スケールをパラメータとして地下水流動解析を行い、流動場における平均透水係数の考え方を示す。

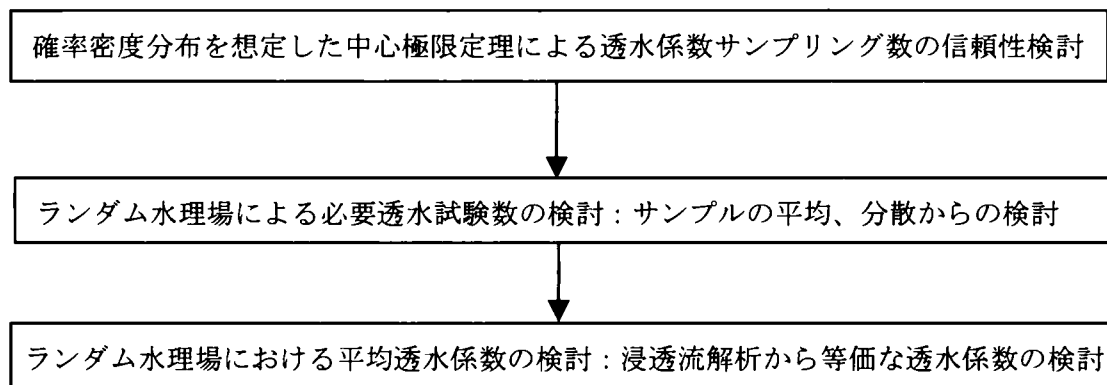


Figure 2.7 第2.6節の検討の流れ

(1) 前提条件

流動場における平均透水係数の考え方を示すための想定推理場として、本節では一般的に想定されるように透水係数が対数正規分布を有し、さらに任意に分布していることを仮定した。

想定水理場として、

- 対象範囲： 水平領域 2km × 2km, 深度 1km (前節の中領域を想定)
- 透水係数単位： 50m × 50m × 50m (母集団要素数=32,000 要素)
- 地質統計量の取り扱い： 透水係数 (花崗岩)
- 対数平均値： -23.7582 ($1e-9$ m/s)
- 対数標準偏差： 2.4637 (約 1 オーダー)

を作成した。

前提条件の対数平均 (λ)、対数標準偏差 (σ) に基づき、対象領域を 50m×50m×50m に分割したものと想定して、ランダムなデータ (母集団) を作成した後、母集団データ (32,000 個) を $X(x, y, z)$ 、 $x=y=40$, $z=20$ の配列に格納した。

(2) 判断基準

未知の調査エリアに対して、ボーリング本数を規定すること、そのための判断基準を設定することは、非常に困難である。ここでは、ボーリング孔で取得することのできる最低限の情報として透水係数を想定して、得られた透水係数が仮想的な水理場を代表しているかどうかについて、得られた透水係数の平均、分散より検討を行う。

ここで用いる判断基準としては、

- 対数平均透水係数の幅 (L) : 2.4637 ($1e-9.5$ から $1E-8.5$)
- 標準偏差の幅 : 同じく 2.4637 (0.5 オーダーから 1.5 オーダー)

と仮定した。この判断基準については、調査の目的やばらつき等の要因から、決定されるべきであり、結果として、基準を下回るとしても机上検討であることを考慮して、一般的な目安を設定した。透水係数のばらつきを 1 オーダーとした。なお、標準偏差は、直接的な判定以外に確率密度から理論的に算定する場合、対数平均値の幅の算定にも用いることとする。

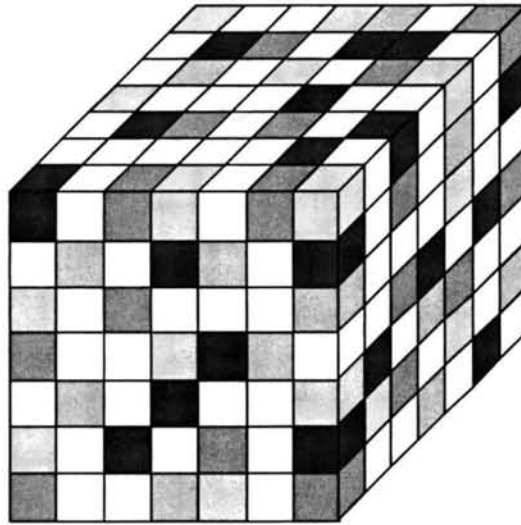


Figure 2.8 仮想的な水理場

2.6.2 確率密度分布からの必要透水試験数の検討

平均値を推定するに当たり、前項で仮定したように透水係数 k が対数正規分布を有する場合、言い換えれば $y = \ln(k)$ が正規分布の場合、 $\ln(k)$ の確率密度関数は、平均値： λ と分散： σ^2 を有する式(1)で表現することができる。

$$F(x, \lambda, \sigma) = 1 / (\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot x) \cdot \exp \left(-(\ln(x) - \lambda)^2 / (2 \cdot \sigma^2) \right)$$

λ と σ は、透水係数 k の平均、分散ではなく、 $\ln(k)$ の関する値であることから、 k の平均分差は、式(2)の用に表現される。

$$E(x) = \exp \left(\lambda + \sigma^2/2 \right)$$

$$V(x) = \exp (2\lambda + \sigma^2) \times (\exp (\sigma^2) - 1)$$

$$\text{ここに、} \sigma(x) = \sqrt{V(x)}$$

中心極限定理より、サンプルの平均の変化（標本変動）を得ることで、母平均 λ を推定する、あるいは母平均の信頼性を得る。この区間推定法における信頼度を Φ とおき、以下の式で表す。

$$P \left(-Z_{\alpha/2} < \sqrt{n}(\bar{x} - \lambda) / \sigma < Z_{\alpha/2} \right) = \text{信頼度 } \Phi(Z_{\alpha/2})$$

上式より、信頼度 $(1-\alpha)$ の母平均 λ は、

$$\bar{x} - Z_{\alpha/2} \times \sigma / \sqrt{n} < \lambda < \bar{x} + Z_{\alpha/2} \times \sigma / \sqrt{n}$$

となる。よって、対数平均透水係数の幅 (L): 2.4637 を得るための必要透水試験数は、

$$L = 2 \times \Phi(Z_{\alpha/2}) \times \sigma / \sqrt{n}$$

$$\text{または、} \quad n = (2 \times \Phi(Z_{\alpha/2}) \times \sigma / L)^2$$

となる。言い換えると試験数の増加が信頼度 $Z_{\alpha/2}$ に与える影響としては、

$$\Phi(Z_{\alpha/2}) = \sqrt{n} \times L / (2 \times \sigma)$$

となり、これにより試験数の増加が信頼度にどれほど寄与するかを図-2に示す。透水試験数が20程度までは、大きく信頼度を改善できることが確認できる。逆に99%の信頼度を得たい場合、設定した条件 ($\lambda = -23.7582 (1e-9m/\sigma)$, $\sigma = 2.4637$ and $L = 2.4637$) において、 n を透水試験数とすると、 $n = (2 \times 2.58 \times 2.4637 / 2.4637)^2 = 26.6$, 条件を満足する試験数としては、27データとなる。

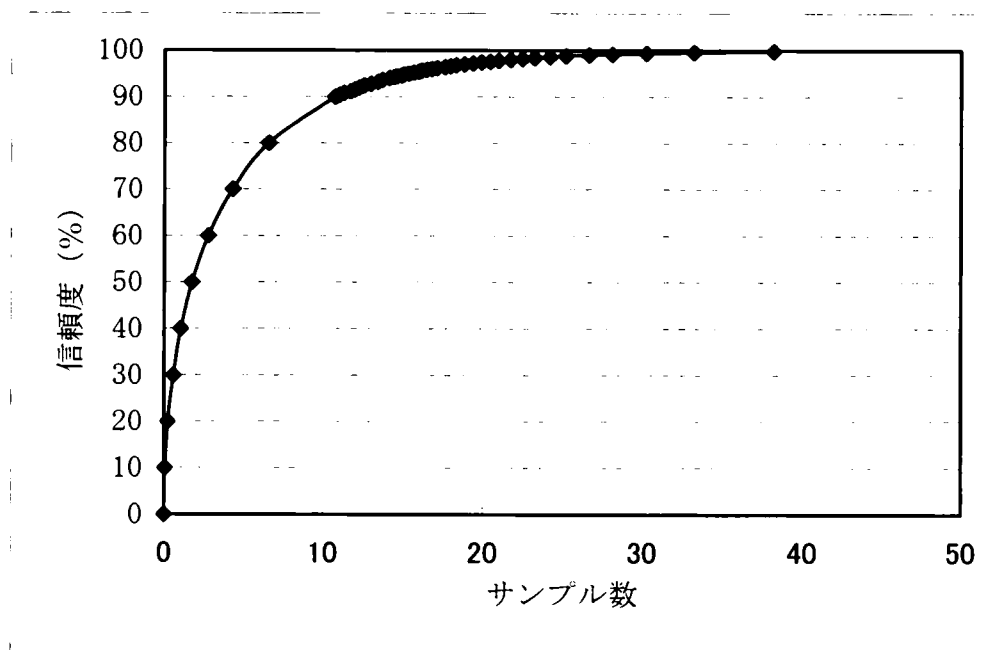


Figure 2.9 透水試験数と信頼度の関係

2.6.3 モンテカルロ法による必要透水試験数の検討

前節での理論的な信頼度評価を確認する目的で、仮想的な水理場を対象にボーリング・透水試験を実施し、得られたと透水係数の統計量（平均と分散）から第2節で設定した判断基準により必要データが取得できたかどうかを評価する。

まず、前節で想定した条件を基に、仮想の水理場をモンテカルロ法により発生させる。水理場は、 $50\text{m} \times 50\text{m} \times 50\text{m}$ を単位として、水平領域 $2\text{km} \times 2\text{km}$ × 深度 1km の水理場を $40 \times 40 \times 20 = 32000$ 要素の透水係数で構成する。仮想水理場の任意の地点に長尺（ 1km ）のボーリング・透水試験を実施し、そのボーリング孔から得られる透水係数の平均値・分散を算出し、母岩（モンテカルロの基礎データ）と比較を行う。

ボーリングは1本から5本まで、平面位置 x, y をランダムに抽出し、データ $x(x, y, z=1-20)$ について、1本の場合は透水試験データ数 20 個、5本の場合の 100 個までの透水データを得る。得られたと統計量の信頼性を確認するため、乱数による水理場を再発生させて3回シミュレーションを実施する。

Figure 2.10 に示すグラフは横軸をシミュレーション回数（10回）、縦軸を誤差（ $\Delta \lambda = \lambda - x$ 、 $\Delta \sigma = \sigma - \sigma$ ）の関係を示したものである。

平均値に関してはボーリング本数の増加に伴い、誤差は小さくなる傾向が見られるが、標準偏差に関してはやや収束傾向が見られるものの顕著では無い。

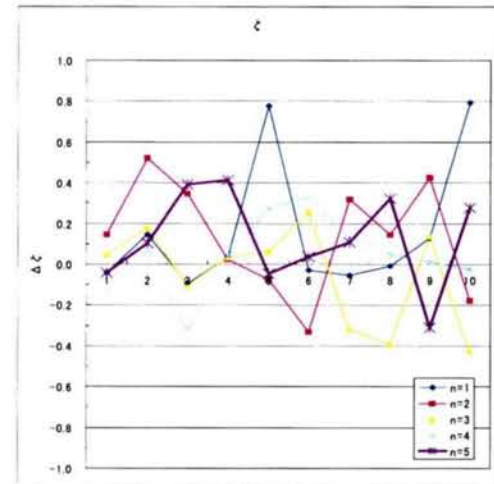
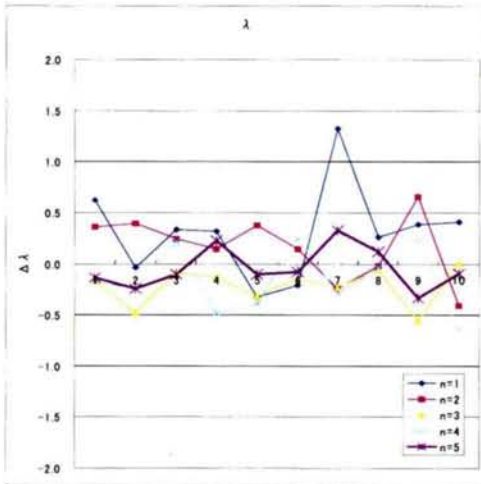
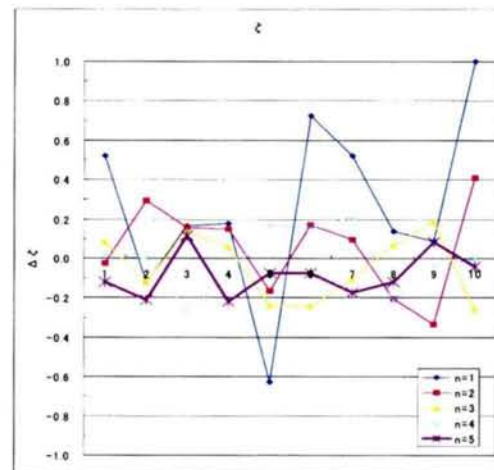
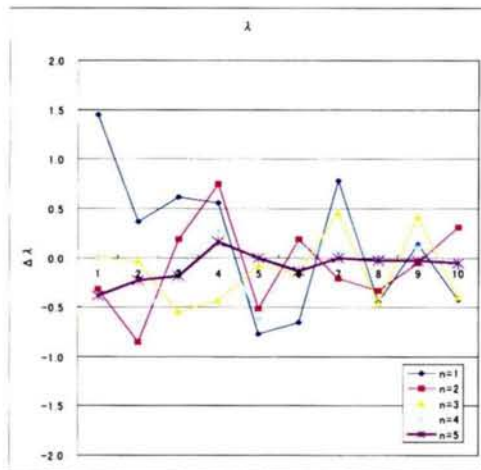
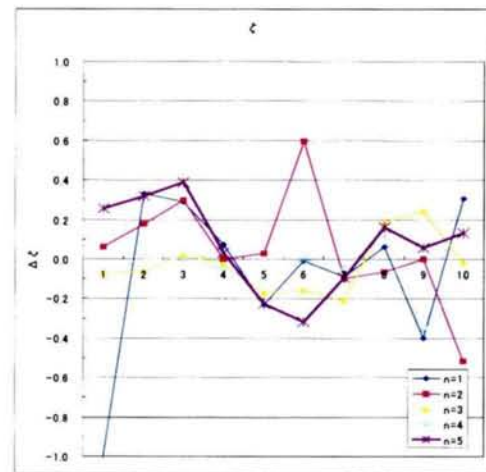
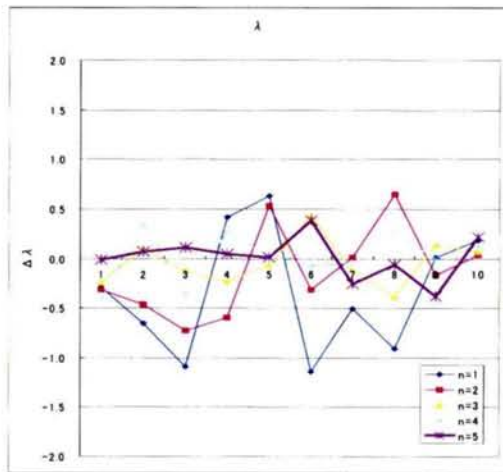
ボーリング数を設定する上での判断基準として、

- ・ 対数平均透水係数の幅（L）：2.4637（ $1\text{e}-9.5$ から $1\text{E}-8.5$ ）
- ・ 標準偏差の幅：同じく 2.4637（0.5 オーダーから 1.5 オーダー）

設定すると、最小のボーリング1本において、30回のどのケースでもボーリング1本以上で判断基準を満たす結果となった。ボーリング1本において、透水試験区間を 50m と想定して、ボーリング長 1km と考えると透水試験数が20個となり、判断基準を満足するデータ数が取得できると判断する。

この結果は、前節での解析でも20回のデータ数で99%の信頼度を有する範囲になることから整合性があると判断する。

ただし、この概略検討においては、透水係数の空間的トレンドや断層・破碎帯のような想定した統計量からはずれる地質特性に対しては対応していないため、そうした原位置の特性を加味した判断が最終的には必要と思われる。



平均値 (λ) のばらつき (10 回)

標準偏差 (ζ) のばらつき (10 回)

Figure 2.10 サンプルデータのばらつき (n: ボーリング本数)

2.6.4 ランダム水理場における平均透水係数の検討

第2.6.3 節までに原位置調査の計画段階において、透水試験を最低どの程度の数量すべきか、試験によって得られる結果をランダムな場における模擬検討を通して、平均と分散の観点から評価した。ここでは、原位置で得られた透水係数を用いて水理場を評価する際に、得られた透水データをどう扱うかについて検討を行う。まず簡単なモデルを基に対象とする水理場に応じた等価透水係数の考え方を整理した上で、第2.6.3 節に用いた同一の水理場を対象に流動スケールをパラメータとして簡易的に浸透流計算を行い、等価透水係数の評価を行う。

(1) 一般論としての等価な透水係数の考え方

ここでは、まず簡単なモデルにより水理場を代表する等価な透水係数について簡易的に計算し、一般論としての等価透水係数に言及する。Table 2.3 に上げる3つの水理場モデルでは、相乗平均（通常地下水流動を評価する時の平均値）は同じ値に設定する。この場合、相加平均、あるいは調和平均は、1桁ずつ上下に異なる。この影響を見るため、仮想的に直交流・並行流の2ケースを想定して、流量の観点から平均値を考察する。 k_1 、 k_2 、 k_3 に並行に地下水が流れる場合（図中、ケース1：平行流）、各層を流れる動水勾配は同じであり、動水勾配と流量の関係から得られる等価透水係数は、 k_1 、 k_2 、 k_3 の相加平均となる。また、 k_1 、 k_2 、 k_3 に直行する地下水流動を想定した場合（図中、ケース2：直交流）、動水勾配と流量の関係から得られる等価透水係数は、 k_1 、 k_2 、 k_3 の調和平均となる。各ケースにおいて、流動方向が大きく流量に影響を与えるため、平均透水係数も流行によって異なる。

- ・ケース1においては、分散の大きい Model 3 が最も大きな等価透水係数を示すのに対して、ケース2においては、全く逆に Model 3 が最も小さな代表透水係数を示す。

- ・各モデルにより同一の平均・分散を有する場合であっても、その空間的相関性と動水勾配の方向により、大きく（2オーダー以上）等価透水係数が異なる。

Table 2.3 想定透水係数

モデル	要素透水係数 (m/sec)			計算流量 (m ³ /sec)		平均透水係数 (m/sec)		
	K1	K2	K3	平行流	直行流	相加	相乗	調和
Model 1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-8}	3.3×10^{-5}	3.0×10^{-10}	3.3×10^{-3}	10^{-5}	3.0×10^{-8}
Model 2	10^{-3}	10^{-5}	10^{-7}	3.4×10^{-6}	3.0×10^{-9}	3.4×10^{-4}	10^{-5}	3.0×10^{-7}
Model 3	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	3.7×10^{-7}	2.7×10^{-8}	3.7×10^{-5}	10^{-5}	2.7×10^{-6}

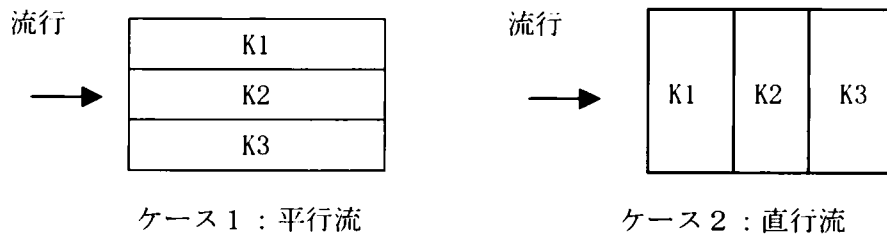


Figure 2.11 簡易浸透流モデル（両端水頭差固定:0.01m/m、両側不透水境界、領域 1m×1m）

上述の関係を一般論として扱うために、計測された透水係数が、対数正規分布に従うと仮定して、検討を進める。

$k = \exp(y)$: k （透水係数）は、対数正規分布に従う。すなわち、 y は正規分布に従うとすると、以下の式が成立する。

$$k = e^y = e^{\bar{y} + y'} = e^{\bar{y}} e^{y'}, \quad k_g = e^{\bar{y}}, \quad y = \ln(k) \quad (2-1)$$

ここに、 $y = \bar{y} + y'$ \bar{y} : 平均, y' : 変動とする。

透水異方性に平行に地下水が流れると想定した場合、

$$k_a = \bar{k} = \overline{(e^{\bar{y}} e^{y'})} = k_g \overline{(e^{y'})} = k_g e^{\sigma_y^2 / 2} \quad (2-2)$$

また、透水異方性に直行流が生じた場合、

$$k_h = \left(\overline{k^{-1}} \right)^{-1} \quad (2-3)$$

となる。ここに、 k_h は調和平均とすると、

$$k^{-1} = \frac{1}{e^y} = \frac{1}{k_g e^{y'}} \quad (2-4)$$

$$\left(\overline{k^{-1}} \right) = k_g^{-1} \overline{e^{-y'}} = k_g^{-1} e^{\sigma_y^2 / 2} \quad (2-5)$$

よって、以下の関係が得られる。

$$k_h = \frac{1}{k_g^{-1} e^{\sigma_y^2/2}} = k_g e^{-\sigma_y^2/2} \quad (2-6)$$

以上のように、一般的に測定された透水係数は、対数正規分布を仮定することにより相加、相乗、調和平均の間に透水係数の対数における変動の分散を用いることで関係を式化した。一般的には、平均透水係数として、相乗平均を用いることでその地層の代表値としている。しかし、透水係数の異方性により用いる等価透水係数が異なる。また、同じ相乗平均を有する場合でも透水係数の計測データの分散が異なる場合、異なる等価透水係数が得られることが判明した。

(2) ランダム場を用いたモデル解析

前節までに水理場の特異性によりあるいはスケールに応じて調和平均と総和平均の間に等価な透水係数が存在することを示し、ある計測データ数によって、等価な透水係数の算出が可能となった。ここでは、前節までに検討した等価な透水係数の適用範囲としての、水理場の領域、分割数についての検討を行った。

検討方法としては、平均・分散の等しい（確率論的に均質な）透水係数を有するスリ場を対象に、浸透流解析を行う。解析モデルは2次元とし、モデル左右の端部の水頭を固定し、上下端を不透水境界に設定、水理解析を行う。浸透流解析結果としての流量と設定導水勾配から、等価な透水係数を算出し、母集団の透水係数の対数平均値と比較を行った。

①モデル条件

- ・ 要素サイズ 50m×50m
- ・ 要素数：縦1要素～20要素、横1要素～20要素
- ・ 動水勾配 0.5m/m で両端固定境界、両側不透水境界

②解析ケース

- ・ ケース1：縦20要素固定、横1, 2, 3, 5, 10, 15, 20要素
- ・ ケース2：横20要素固定、縦1, 2, 3, 5, 10, 15, 20要素
- ・ 各々ケースとも20リアライゼーション（ランダムデータを含め、20回）

ケース1の流量の解析結果から算出した等価透水係数をFigure 2.13に、ケース2の流量の結果から算出した等価透水係数をFigure 2.14に示す。

ケース1の場合、1×20モデルでは、最も低い透水係数に影響を受けるため、調和平均付近に等価透水係数が位置し、要素数を増やすに従い、より相乗平均に近づく傾向を示

す。ケース2の場合、逆に 20×1 モデルでは、最も高い透水係数の影響を受け、相加平均付近に等価透水係数が位置し、要素数を増やすに従い、より相乗平均に近づく傾向にある。

各々のケースで、要素列が増えることによる影響を評価するために20リアリゼーションの等価透水係数の平均値をFigure 2.15に示す。 5×20 モデル、あるいは 20×5 モデルから相乗平均付近に収束する傾向が見られた。

これより、①ある水理場をモデル化する場合、そこが本研究で提示した空間的に相関を持たないランダム場であれば、地下水流動を評価する上で10分割以上で、不均質性を有する場においても均質場としてモデル化可能である、さらに②ある領域を地下水流動解析する場合、対象とする領域の1/5程度の領域より大きい特性（透水性から見た不均質性）を持った要素がある場合、均質なモデルとして扱うことに誤差が生じる。本モデルで言えば、 5×20 モデルにおいて、5要素の中で大きい割れ目など高透水ゾーンが存在する場合、均質場としてモデル評価することで誤差が生じる可能性がある。この場合、対象となるスケールの割れ目が全て同定できる場合は決定論的にモデル化し、全ては同定できない場合は、3章で示すような不均質性を加味した確率論的なアプローチをする必要がある。

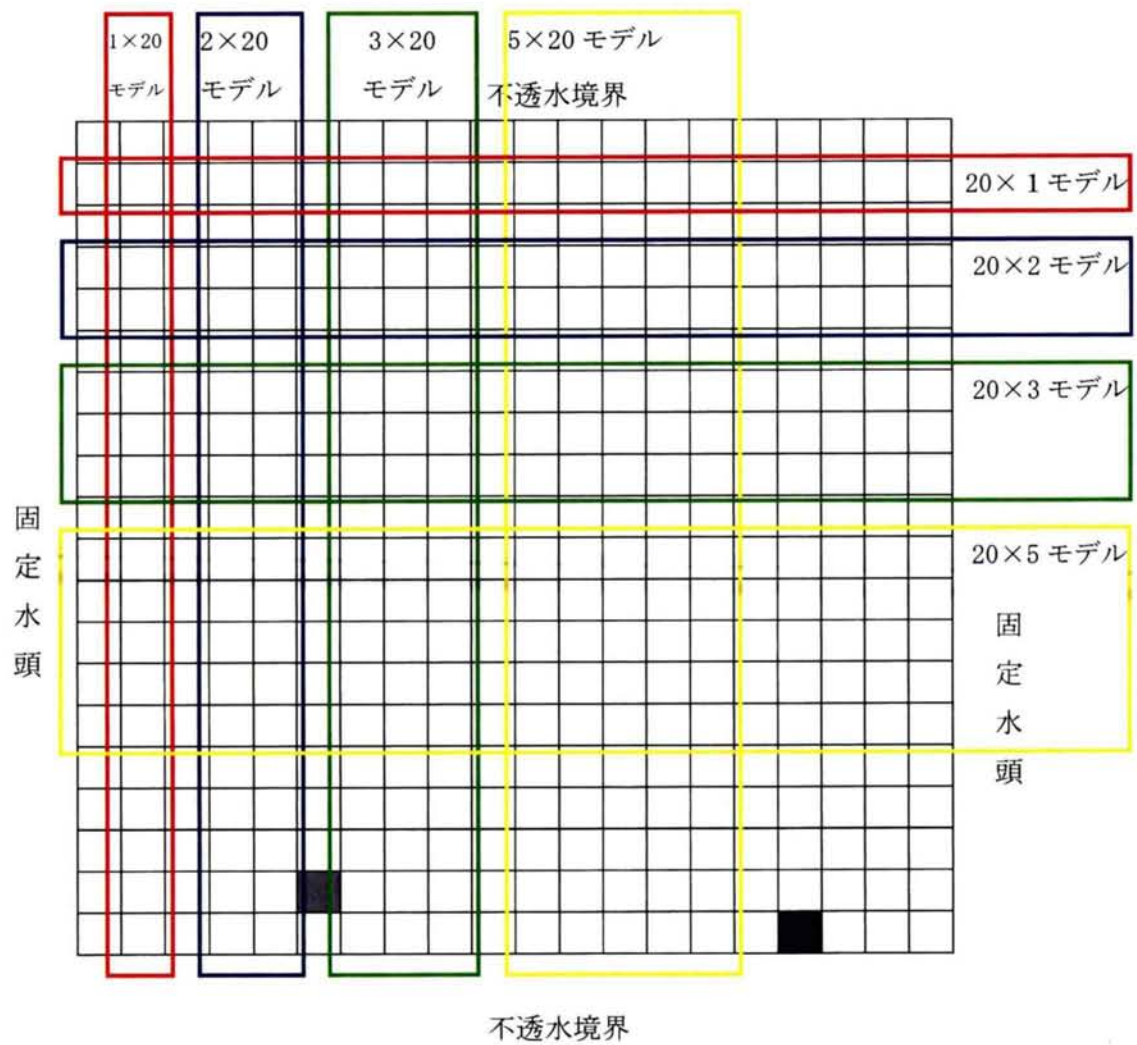


Figure 2.12 模擬検討用水理場

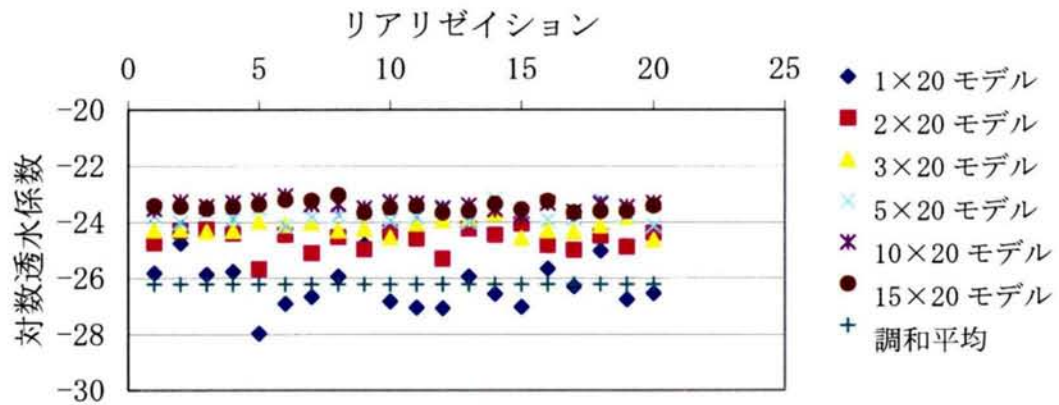


Figure 2.13 ケース 1 : 流行に平行方向にメッシュ数を増やした解析例

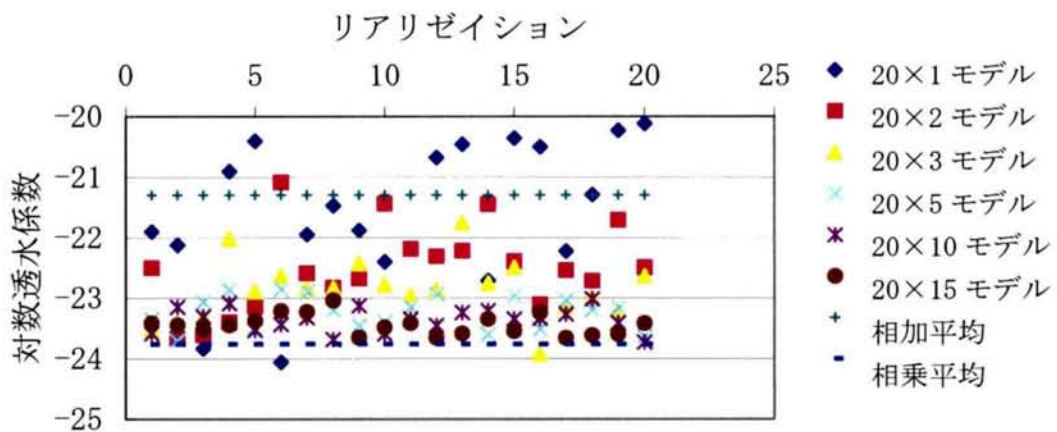


Figure 2.14 ケース 2 : 流行に直交方向にメッシュ数を増やした解析例

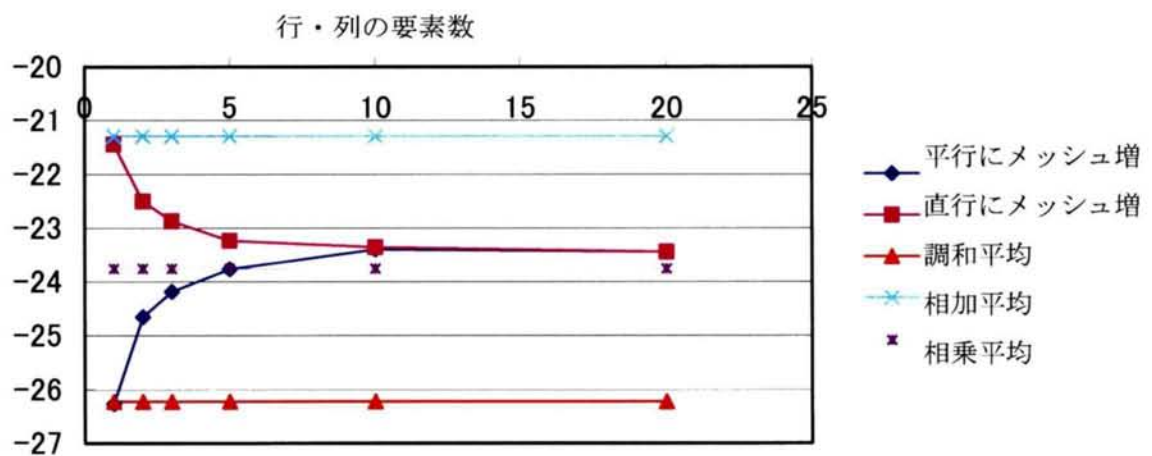


Figure 2.15 20 リアリゼーションの平均値

2.7 まとめ

本章では、調査で得られる情報と評価に必要な情報を整理し、データフローダイアグラムとして、その連関を設定した。このデータフローダイアグラムは、3章以降の研究の位置づけを明確化する上でも重要な整理となった。さらに、例題的にボーリング孔による透水係数測定と地下水流動評価について、具体的にその連関を示し、①数キロオーダーのランダムな水理場を想定すると透水係数の計測数はある程度の数（今回の検討では20測点程度）からその信頼性はあまり向上しないこと、②ある領域をモデル化する場合、そこが空間的に相関を持たないランダム場であれば、地下水流動上は10分割以上で均質場としてモデル化できる、③ある領域を地下水流動解析する場合、対象とする領域の1/5程度の領域より大きい特性を持った要素がある場合、均質なモデルとして扱うことに誤差が生じる。例えば、100mを対象とした地下水流動場において、10m～20mより大きい割れ目など高透水ゾーンが存在する場合、モデル評価上無視することで大きな誤差が生じる危険性がある、等の知見を得ることが出来た。

参考文献

- 奥野哲夫、鈴木誠：被圧地下水を対象とした拡張カルマンフィルタによる透水試験の空間分布推定法、土木学会論文集、No. 469／Ⅲ-23, pp93-102, 1993
- 齋藤雅彦、川谷健：透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察、土木学会論文集、No. 694／Ⅲ-57, pp245-258, 2001. 12
- 前川恵輔、尾形伸久、柳澤孝一、高瀬博康：フラクタル理論による堆積岩中の透水係数分布の推定、動燃技報、No. 98, pp. 71-76, 1996

第3章 確率論を用いた物質移行場の連続体的アプローチ

3.1 概要

地盤や岩盤における地下水の汚染問題がクローズアップされている。その一例として、放射性廃棄物の地下深部岩盤中への処分が検討されており、放射性核種の地下水中の移行を含めた不連続性岩盤の浸透流に関する研究が国内外でなされている。

本研究は、地下水の汚染問題を扱う上で必要となる浸透流解析のアプローチとして、連続的な透水モデルを確率論的に扱うものである。対象とする媒体は、地下水の流れを把握することの困難が予想される亀裂性岩盤を対象とする。

そこで本研究では、透水係数の実測値をもとにクリギング手法の一つであるしたモンテカルロ法によるコンディショナルシミュレーションにより、有限要素法の要素イメージを単位とした高いレゾリューション（分解能）で個々の要素に透水係数を与えることにより表現した水理場を確率論的に同一（平均、分散の等しい）な100ケースをモデル化し、さらに水頭についてはトレンドを考慮して2次の残差方程式よりクリギングを用いて境界条件を設定し、浸透流解析を行った。

3.2 既存の研究

亀裂性岩盤の浸透流解析としては、亀裂をディスク・パイプ等にモデル化するフラクチャーネットワークモデルあるいは透水係数で表現する連続体モデルが挙げられ、その解析は決定論的にまたは確率論的に行われている。

フラクチャーネットワークモデルに必要なデータとしては、岩盤の透水係数、水頭はもちろんのこと、掘削面やコアの観察による亀裂の幅、頻度、方向等の把握が重要で、かつ複雑な亀裂から浸透経路となる亀裂の選択手順が曖昧である。また、従来の連続体モデルは、比較的簡単に解析が可能であるが、割れ目系岩盤をポーラスで等価な場として取り扱うため、特性値の異方性や空間的变化が評価できない。これに対し Neuman(1987)らは、得られた透水係数を確率論的に評価し水理場を想定するため、異方性や空間的变化を評価しながら、比較的簡単に割れ目等の地質データを必要とせずに岩盤中の地下水の流れを評価する試みがされている。

Cacas(1990a)らは、亀裂性岩盤中の地下水の移流と拡散問題をパイプによるネットワークモデルとして表現している。具体的には、10mスケールを対象とした17個のランダムネットワークモデルを構築した。このモデルに対して、外部固定境界を設定した定常流解析を行い、17個の等価透水係数を算出している。この等価透水係数は、10mスケール

の岩盤における確率論的に均質かつ等方な代表値として扱われている。さらに、3次元の等価透水係数の概算式 $K_{eff} = K_g (1 + \sigma^2 / 6) = 1.6 \times 10^{-8}$ から 10m スケールより大きなスケールでの透水係数を定量的に評価している。

本研究では、Neuman (1987, 1988)により提案された手法を基にフラクチャーネットワークモデルが ①坑道周辺の個々の割れ目についての形状・寸法、流動特性、物質移行特性評価が困難かつ時間を要すること、また②時として、割れ目の形状・寸法が坑道周辺に分布する多くの割れ目において、透水性と整合しないことを考慮すると、確率論的に均質な連続体アプローチにより同程度の精度で評価できることを示すことを目的としている。

本研究は、原位置での空間的に広がった透水係数値（他の岩盤特性を含む）をある相関を持ったランダム場として捉え、かつ個々の割れ目の持つ透水特性や物質移行特性などの詳細情報を必要としない確率論的連続体評価によるものとする。この概念を基本として、

Neuman と Depner (1988)らは、割れ目の卓越した花崗岩に対して、Chen et al. (2000)、Vesselinov (2001)らや Hyun (2002)らは、不飽和領域の割れ目系のタフに適用することに成功している。

移流や物質移行に大きく影響を与える比較的大きなスケールの割れ目については、Neuman (1997) は、ランダム場における決定論的な空間相関性をもって扱っている。

3.3 原位置データの概要

本研究で対象とする原位置試験は、フランスの放射性廃棄物関連の研究組織(IPSN)が、ウラン採掘の Fanay-Augères 旧鉱山を利用して各種地下実験を行っている結果から引用している (Cacas ら、1990a)。試験は、地下 150m の割れ目が卓越した花崗岩中に位置する 100m の水平坑道を対象としている。10 本のボーリング孔（各ボーリング孔の長さは、50m）が放射状に掘削されている。10 本は、3 本 4 本 3 本の組み合わせで鉛直断面を構成し、各 25.9 m と 23.7 m 離間している (Figure 3.1)。鉛直平面 1 と鉛直平面 3 は、3 本のボーリング孔からなり、鉛直平面 2 は 4 本のボーリング孔を有する。割れ目の成城については、坑道壁面観察およびボーリング孔のコア観察を実施している。透水試験については、180 区間を試験対象として、試験長 2.5m 直径 76mm を対象に 10Mpa の圧力で注水試験を行っている。同様の注水試験を 10m の試験長を対象に 50 区間、50m の試験長を対象に 10 区間で行っている。間隙水圧のモニタリングは、5m の区間長の 68 区間において 1985 年の 2 月より 1986 年の 3 月にかけての延 400 日間実施している。計測値よりトンネルのすぐ上面でほぼ水平に地下水面が形成されている事が確認された。

トンネルへの湧水量測定は、ボーリング孔掘削の前後も含め継続的に実施された。間隙水圧は、400 日の間に 2 ステージのほぼ定常区間とその間のボーリング孔掘削に伴う非定常区間を示している (Figure 3.2)。その間 2 回のトレーサ試験を実施している。トレーサ試験は、F 2 ボーリング孔および F 3 ボーリング孔を利用して 5 m 区間に数種類の非吸着性

トレーサーを注入している (Table 3.1 および Figure 3.3)。

トレーサー試験のナンバリングは、最初の数字がパッカー位置を示し、残りでボーリング孔の番号を表現している (例えば 4F3 は、F3 ボーリング孔の内から 4 番目のパッカーによるトレーサー試験を意味する) 最初のトレーサー試験期間中 (1985 年 9 月 19 日) に、2 種類のトレーサーが 7F2 に注入され、1 種類のトレーサーが 6F2、4F2、1F2 および 4F3 に注入された。2 回目のトレーサー試験期間中 (1985 年 12 月 19 日) に、1 種のトレーサーが 3F2、6F3、3F3 および 1F3 に注入された。トレーサーの濃度は、ロケーション “A” (Table 3.2)、ロケーション “B” (Table 3.3) およびロケーション “C” (Table 3.4) の 3 カ所において計測されている。3 カ所において、トンネル延長の全トレーサー濃度を計測するシステムとしている。

本研究においては、地下水流動および物質移行に関して、確率論的解析手法により現位置試験をモデル化した。さらに、モデル化に当たっては、前述の要素スケールの制約を考慮し 2.5m の透水試験区間を最小単位として設定した。

このデータを用いる理由としては、①亀裂性岩盤である結晶質岩でのデータであり長期にわたり、種々の試験が行われていること、②Cacas らが 3 次元亀裂モデルを用いて移流拡散解析が行われ (Figure 3.4)、このモデルは Gelhar によれば現状最も良好に亀裂性岩盤を評価しているフラクチャーネットワークモデルであることが挙げられる。

なお、今回の解析対象の Fanay-Augères (Figure 3.1) の試験サイトにおいても断層が確認されているが、Cacas (1990a-b) 他 および筆者らはモデル領域に加味する必要がないと判断している。この理由は、広域において用いられる本手法の検証において、Cacas らがモデル化した領域と同レベルの領域をモデル化し解析することにより、本手法が割れ目ネットワークモデルで取り扱われるスケールですら地下水流動および移流分散において同等以上の結果を得られることを示すことで、必要以上に複雑なモデル化することは、無いと考えている。

Table 3.1 トレーサー試験の諸元

Injection Number	Chemical	Quantity of tracer	Solution and Rinse (L)	Injection time	
	Species			Date	Time
7F2	Iode INa	0.48kg	9.0+5.0	19/09/85	15:14 to 15:40
7F2	Lithium	0.540kg	9.0+5.0	19/09/85	15:14 to 15:40
6F2	Nickel E.D.T.A.	0.025kg	9.0+12.0	19/09/85	13:55 to 14:56
4F2	Fluoresceine	0.09kg	9.0+10.0	19/09/85	10:35 to 11:21
3F2	Rhodamine WT	1.10E-4 m3	10.0+5.0	19/12/85	15:14 to 15:40
1F2	Zinc E.D.T.A.	0.4kg	9.0+6.0	19/09/85	9:16 to 10:17
7F3	Amino G	0.1kg	9.0+2.0	19/09/85	15:14 to 15:40
6F3	Zinc E.D.T.A.	0.25kg	10.0+5.0	19/12/85	10:30 to 11:00
4F3	Rhodamine WT	1.10E-4 m3	7.0+10.0	19/09/85	16:22 to 17:03
3F3	Amino G	0.05kg	10.0+3.0	19/12/85	13:53 to 14:10
1-F3	Iode INa	0.05kg	10.0+5.0	19/12/85	15:14 to 15:40

Table 3.2 測定位置Aにおけるトレーサー計測データ

Injection Number	Recovery Rate	Arriving time (h)		Observation Period (h)	Breakthrough	
		First	Peak		Duration (h)	Curve
7F2I	13%	2.5	10.5	973	100	Fig.2.13
7F2L	7%	2.5	10.5	942	2500	Fig.2.14
6F2	6%	3.5	12.8	349	160	Fig.2.15
4F2	0%	10	29	942	-	Fig.2.16
3F2	0%	-	-	1000	-	-
1F2	0%	-	-	1000	-	-

Table 3.3 測定位置Bにおけるトレーサー計測データ

Injection Number	Recovery Rate	Arriving time (h)		Observation period (h)	Breakthrough	
		First	Peak		Duration (h)	Curve
7F2I	45%	2.5	33.5	628	600	Fig.2.4
7F2L	15%	2.5	31.3	630		Fig.2.5
6F2	6%	3.5	-	628	-	-
4F2	0%	10	-	942	-	-
3F2	0%	-	-	1000	-	-
1F2	0%	-	-	1000	-	-
7F3	-	-	-	3967	-	-
6F3	14%	43	744	2039	4000	Fig.2.6
4F3	5%	15	173	985	1200	Fig.2.7
3F3	0%	18	260	1933	2000	Fig.2.8
1F3	0%	-	-	1000	-	
* 2I indicates the Iode Na, 2L means Lithium						

Table 3.4 測定位置Cにおけるトレーサー計測データ

Injection Number	Recovery Rate	Arriving time (h)		Observation Period (h)	Breakthrough	
		First	Peak		Duration (h)	Curve
7F2	7%	17	69	633	600	Fig.2.9
6F3	9%	570	1080	2480	4000	Fig.2.10
4F3	0%	50	420	990	2000	Fig.2.11
3F3	0%	46	600	2000	2500	Fig.2.12

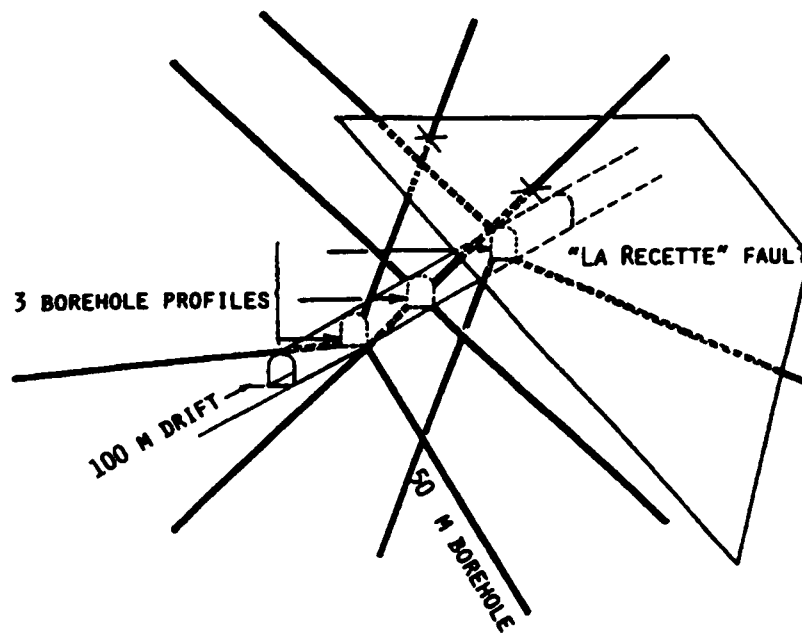


Figure 3.1 調査坑道およびボーリング孔のレイアウト (Cacas 他より, 1990a).

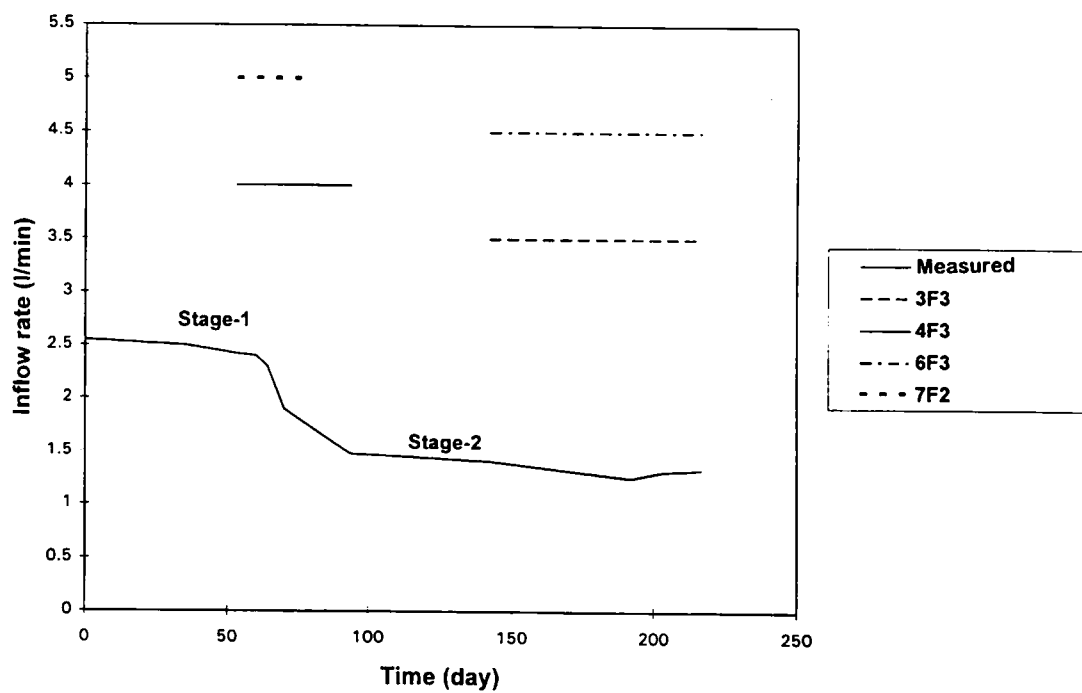


Figure 3.2 調査坑道への湧水量の経時変化とトレーサー試験の実施時期の関係

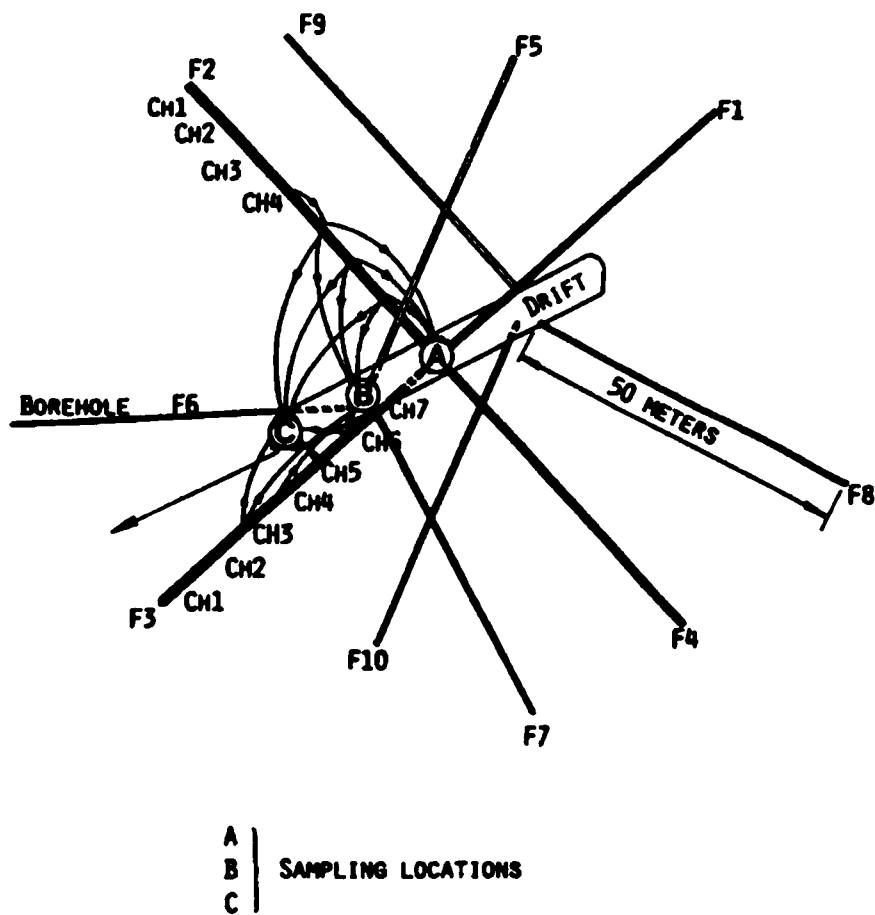


Figure 3.3 トレーサー注入区間と調査坑道での計測位置 (Cacas 他より, 1990a)

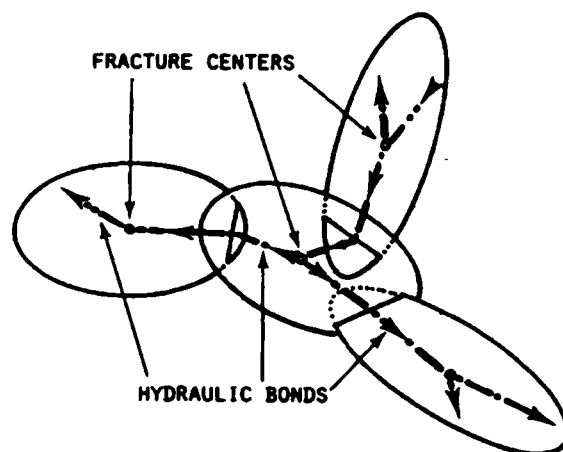


Figure 3.4 移流拡散解析用の3次元ネットワークモデル (Cacas 他より, 1990a).

3.4 境界条件としての水頭の推定

3.4.1 水頭の特徴

地下水流動解析および物質移行解析を行う場合、重要な問題として境界条件の設定が挙げられる。地下水流動解析の場合、一般的な境界条件としては、全水頭一定の水平流れを境界上で仮定する、あるいは境界の影響を避けた領域まで考慮して不透水境界を仮定する等が考えられる。しかし、実際には図に示すように広域地下水ですら平行流になることは、希である。また、領域を広くとると場の透水性の信頼度が下がる等の課題がある。そこで、境界条件としての水頭の特徴を挙げると、

- ・水頭の連続性：土中や岩盤中において、水頭は必ず連続した値を示す。花崗岩等の亀裂における卓越流路の場合、不連続（近傍の計測点でオーダーの異なる）な計測値を示すこともあるが、透水係数がオーダーで異なる事と比較すると一般的には差が小さい。
- ・一般的には深さ方向と水平方向にある傾向（トレンド）を示す。

均一場を考えた場合、ある一定の水頭のもとで、水平流れが存在する。逆に、一定速度で水平に流れている場合、水平に一次関数で水頭を表現することができる。岩盤中で一定の透水係数を想定することは難しいが、この特性を生かして広域流動を解析するときは飽和域での地表面形状を考慮した水頭を固定し、鉛直には圧力水頭の変化を0として、地下水流動解析を行っている。しかし、亀裂が選択経路的に流れると想定されるような狭い領域においてしばしば、均一でない流れとして例えば、鉛直に流れを有する。このような場合、この境界設定では現象をうまく表現できない。広域においてはこの問題は無視し得るのかもしれないが地下にトンネル等を掘削し、坑道への地下水の浸入を考えた場合、局所的な地下水流れにおいては、原位置の計測データに沿った境界条件を設定する必要がある。

そこで本論文では、統計解析手法の一つであるクリギングを用いる。透水係数や水頭のように空間的にある種の相関関係が存在する場合あるいは存在すると仮定する場合、その相関関係を利用して空間的に広がる物性値を推定する手法の一つとして、クリギングが挙げられる。クリギングでは、計測点間の距離をパラメータとしたバリオグラムを求め、推定誤差分散を最小にする最適化を行うことにより、任意の点における推定値を重み付けされた計測値の和により表すことができる。クリギングの特徴は、計測されたデータ間の相関性を距離で表現するため、計測データに近い値はその計測データに大きく影響され、ある範囲（レンジ）を越えるとその影響はほとんどなくなる。クリギングを用いた推定法は、いかに精度よくその影響度合い、範囲、方向性を推定するかと共に推定値をどのように評価するかが一つの問題である。

特に推定値に明確なトレンドが存在する場合にそれをどう扱うかが非常に重要な問題であり、地盤・岩盤物性においてはしばしばそのトレンドが見受けられる。そこで、同様にトレンドを有すると思われる地下水頭についてトレンドを評価した解析例を本論文では示

す。

Figure 3.5 に圧力水頭のバリオグラムを示す。これは、単調増加を示し、明らかなトレンドを表している。このようなトレンドは水頭の場合、鉛直方向に強く、水平方向に最も弱く示すと予想される。

このような非定常（ノンステーションナリー）の場合、以下の3タイプの対処が考えられる。

- ① ある限られた領域に於いて定常を仮定する。de Marsilyによれば「ローカルステーションナリー」と呼ばれるものである。
- ② データよりあるトレンドを傾向式として扱い、 $(Z(x) - m(x))$ を用いて再度バリオグラムを作成、定常を得る。なお、 $m(x)$ は、位置関数として既知とする。
- ③ データを擬似的に定常と仮定する。

ここでは、②に示す方法を採用する。①の場合、境界条件を設定する上で測定点が不足し、局所的には水頭の境界条件を推定できない。また、③の場合は推定に大きな誤差が生じる可能性があるためである。

de Marsily (1993) は、このトレンドの除去において ordinary least square よりも universal least square が望ましいとしているが、Neuman (1987) は両者を比較し、その差が大きい事を確認しているため、本検討では、その取り扱いの便利な ordinary least square を用いた。

3.4.2 原位置データへの展開

Figure 3.5 に示す測定値（0次）によるサンプルバリオグラムにおいては、トレンドが明らかに存在し、収束しない。これは非定常を意味している。さらに、空間座標の1次方程式による残差に対してサンプルバリオグラムを Figure 3.6 に示す。まだ収束性が悪く、ナジェットの項が存在する。Figure 3.7 に2次関数による残差に対して検討すると収束性が改善されている。なお、Figure 3.8 に示す3次関数による残差では純粋なナジェットモデルとなり、相関性が存在しなくなる。

トレンドを評価したクリギングの場合の問題点として、あまり残差方程式を用いるとクリギングの基本である空間的相関性を失ってしまうため、意味をなさなくなること。また、残差方程式に大きく依存されることが問題である。そこで、本論文では、相関性を保った形で推定のしやすい空間座標の2次関数を用いることとする。

サンプルバリオグラムを残差について算定し、さらに算定誤差を最小にするため、サンプルバリオグラムにより異方性を考慮した。バリオグラムのフィッティングは、トライアンドエラーで行い、設定した。

3.4.3 原位置データによる地下水流動および物質移行解析のための水頭の推定

今回の原位置データでは、不飽和領域が存在するため、不飽和領域にはいると極端にトレンドが変化した。そこで、全水頭によるクリギングを実施した。

Figure 3.2 に示した流入量の時系列的変化を考慮して、Stage-1 と Stage-2 の2段階を設定し、両者をほぼ定常状態とみなし各ステージに対して境界条件となる水頭を推定した。

なお、不飽和領域と飽和領域の境界をより精度良く求めるには、不飽和と飽和を別途解析してカップリングする方法が良いのではないかと考える。ただし、本論文では、飽和領域のみを対象とすることから、全水頭による推定を実施した。

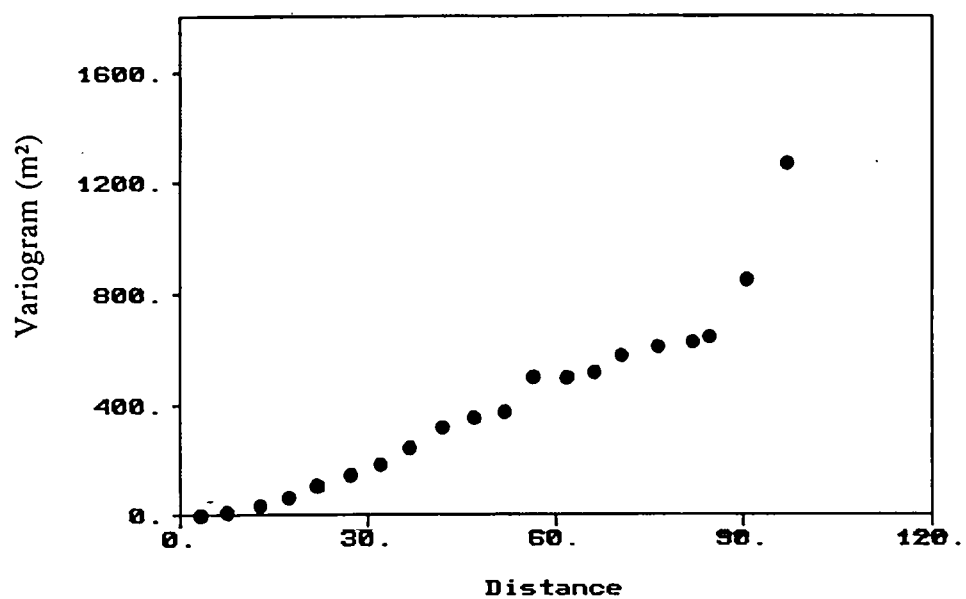


Figure 3.5 圧力水頭のサンプルバリオグラム

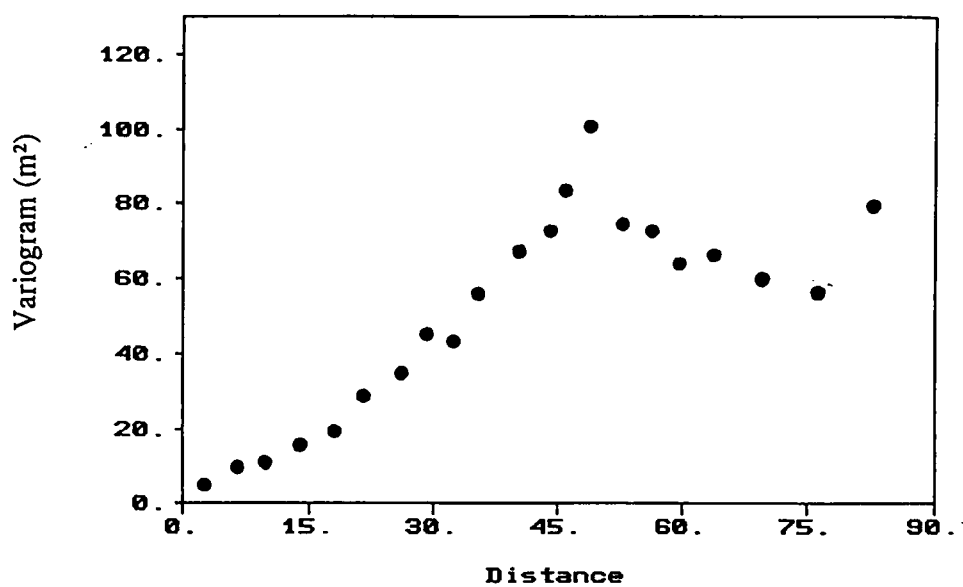


Figure 3.6 圧力水頭の一次残差サンプルバリオグラム

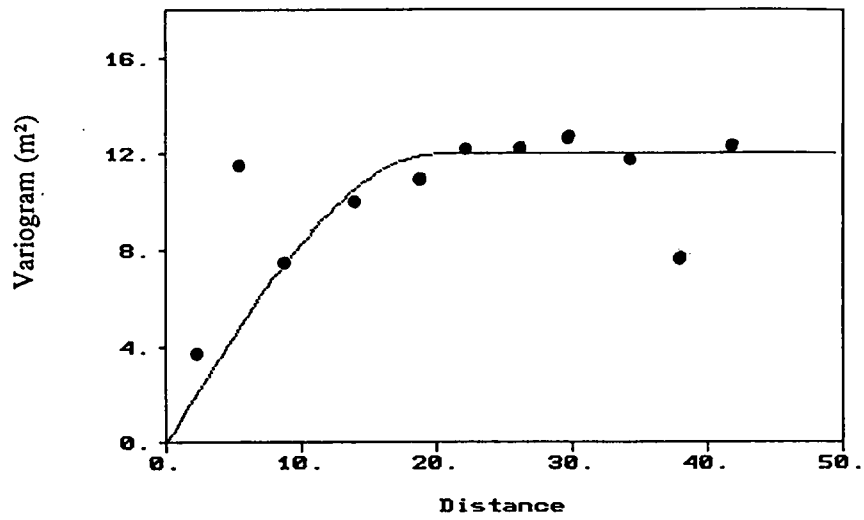


Figure 3.7 圧力水頭の二次残差サンプルバリオグラム

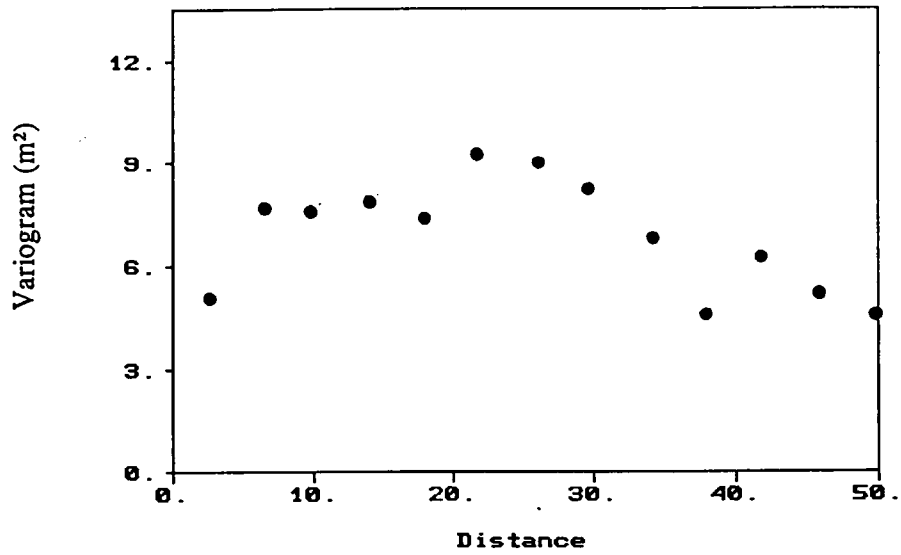


Figure 3.8 圧力水頭の三次残差サンプルバリオグラム

3.5 透水係数の確率論的アプローチ

3.5.1 透水係数の特徴

透水係数はしばしば隣り合う計測点において、1～2オーダー異なる値を示すこともあり、水頭と比較すると距離相関を考慮した評価が困難な場合がある。また、透水係数を計測する場合、時間的制約や透水性を評価する原位置での手法あるいは評価手法による制約で計測値に下限値が存在する場合がある。本論文は、こうした不均質で不確実性を含む透水データを対象として、合理的な評価を試みる。実際に用いる透水データは、Figure 3.9 に示すように亀裂性岩盤で透水係数に明瞭な連続性がなく、透水係数の下限値を有している。

3.5.2 原位置データへの展開

本検討では、まず透水試験結果を検討し、水理場を表現した。水理場の作成に当たっては、データを直接的に扱う従来の統計解析ではなく、インディケータ統計解析を実施した。この評価において空間的に相関をもつ水理場から抽出されたサンプルとして、計測値を取り扱う。この際、著者らは、計測下限以下の値を有効に利用するために通常の統計学的手法を使わず、計測データを段階に分け、各段階におけるインディケータを用いた (Figure 3.10)。この部分を正当に評価することにより低透水性岩盤中のトレーサの移動遅延についての評価に大きく寄与する可能性もあると考える。

インディケータクリギングは、まず第1に透水係数をもし $K(\mathbf{x}) \leq K_c$ であれば、 $I(\mathbf{x}; K_c) = 1$ 、あるいは $K(\mathbf{x}) > K_c$ であれば 0 のバイナリー形式に変換する。ここに、 K_c は、インディケータカットオフとして定義する値であり、 \mathbf{x} は、位置ベクトルである。ここでは、Table 3.5 に示すように6段階のインディケータカットオフ値を設定し、透水係数を7グループに分割した。各グループの全体に占める割合について、併せて Table 3.5 に記す。第1カットオフ値は、計測下限値とし、第3カットオフ値は中央値とした。インディケータ分析の特徴は、①全体の分布形状を仮定する必要がない、②計測値の上限下限値に支配されない、言い換えると上限より高い透水係数、および測定下限値に設定された値より低い透水係数推定値を作り得る。

Figure 3.10 によれば、もし計測下限値を無視すれば透水係数の対数値 ($Y = \ln K$) は、若干プラス側によったほぼ正規分布を示すことが分かる。今回のインディケータ分析は、下限値以下の領域に対しては放射モデルを採用し、上限値以上については、ハイパボリックモデルを採用した。この結果、グループの比率や分散形状等の統計的なデータを保存したまま、下限値以下、計測された上限値以上のデータについても分散することが出来た。

次のステップは、インディケータに変換されたデータを元にインディケータバリオグラ

ムを作成する。

全てのカットオフに対して、18m から 23m の空間相関性を持ったスフェリカルモデルが適合した。1 から 5 のカットオフに対しての共分散関数は、0.16 から 0.25 のシル（相関性）と 0.10 to 0.16 のナジェット（誤差）を有している。6 カットオフに対しては、非常に小さいシル(0.05) とナジェット(0.02)が得られたが、データ数の少なさ（Table 3.5）から考えて信頼性が低いと判断した。結果、6 個の正規化した共分散関数と中央値の共分散関数は非常に類似したものとなった（Figure 3.11）。そこで、中央値の等方性共分散関数を用いて計算することとした。

Caca ら（1990a）によれば、ボーリング孔の位置する 3 鉛直断面は、ほぼ定常の水頭を示していることから、3 鉛直断面を 2 次元に投影して流動解析モデルを構築して評価可能と判断した。そこで、本研究では、透水係数および間隙水圧について 1 鉛直断面に投影した 2 次元解析をすることとした。

インディケータクリギングは、個々のカットオフ値に対して、条件付き確率 $P[K(\mathbf{x}) \leq K_c | \mathbf{K}^T]$ を持った最適直線補間 (BLUE: best linear unbiased estimate) (Gómez-Hernández and Srivastava, 1990) である。本研究では Deutsch と Journel (1998) のアルゴリズムを用いて透水係数のリアリゼーションを構築しているが、Figure 3.12 に示すように第 5 カットオフ値を超える値を有している。

Table 3.5 透水係数のインディケータカットオフ値とその値を超えない割合

Indicator	Value of K (m/s)	Percent of data
1	8.0E-10	27
2	1.3E-08	40
3	4.0E-08	53
4	2.0E-07	68
5	4.0E-07	81
6	6.0E-06	95

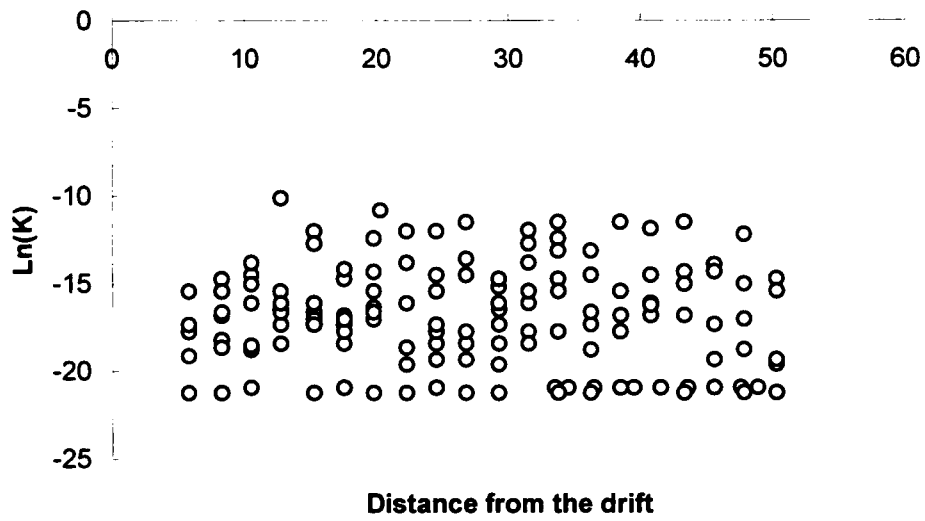


Figure 3.9 調査坑道からの距離と透水係数の対数値の関係

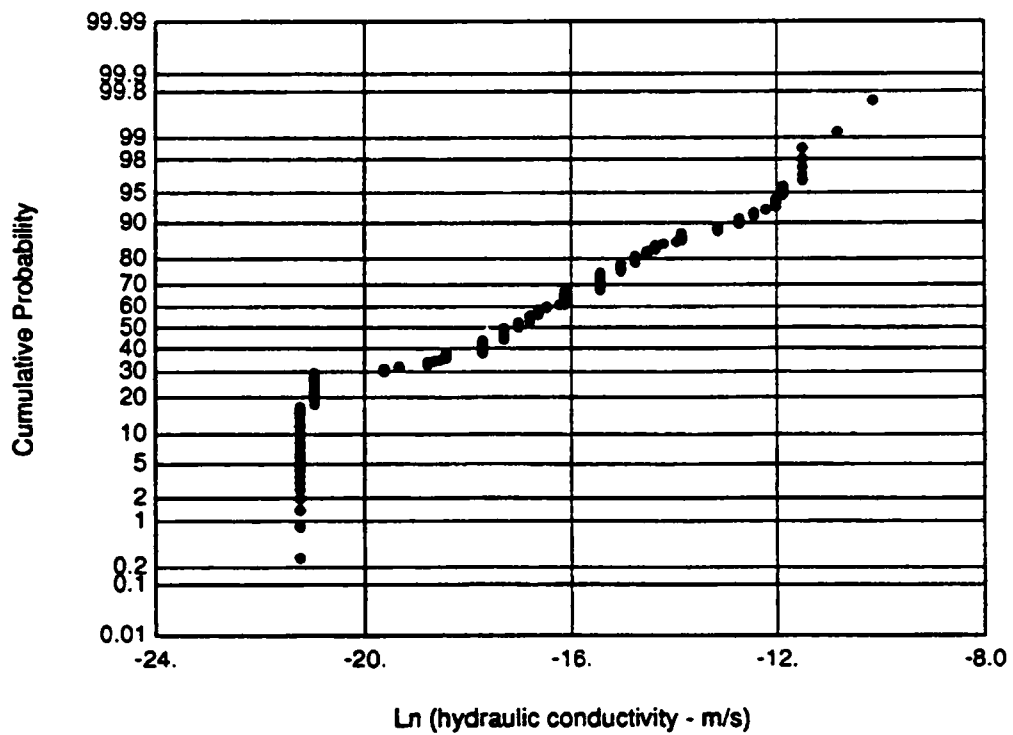


Figure 3.10 2.5m パッカー試験による透水係数の対数値の累積分布

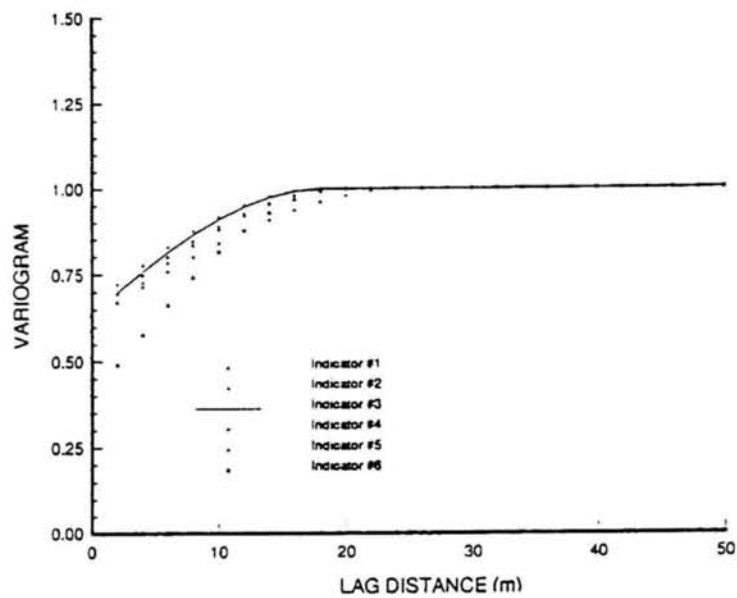


Figure 3.11 インディケータ3段階により正規化された透水係数の対数値 $Y = \ln K$ の全方向インディケータバリオグラム

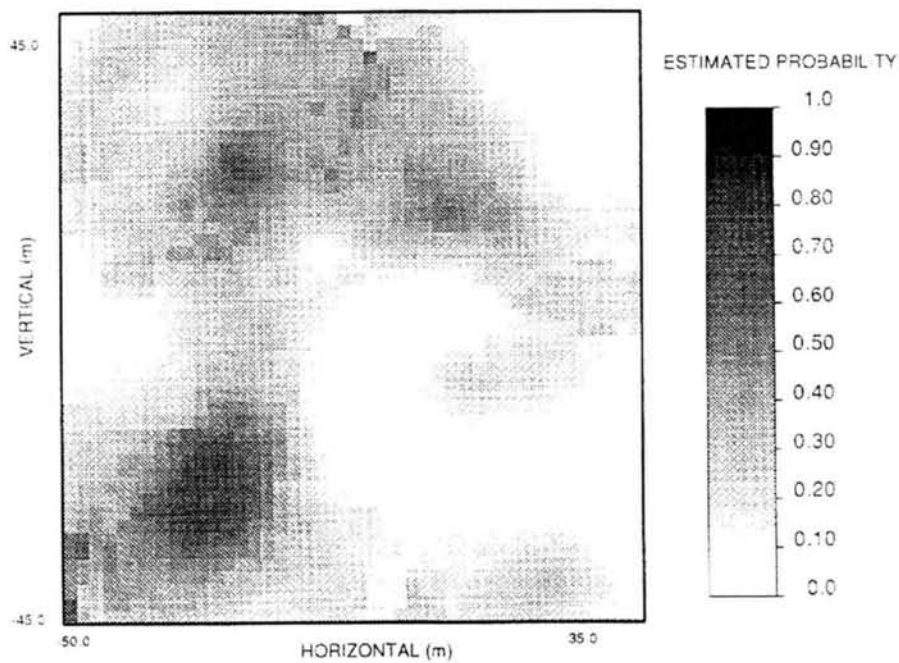


Figure 3.12 第5インディケータを越える透水係数の確率評価

3.5.3 水理場のリアリゼーション

最終的に 100 リアリゼーションの確率論的に等しい水理場をモンテカルロシミュレーションにより用いた。透水係数場構築に当たっては、シーケンシャルアルゴリズム(Deutsch と Journal, 1998) を用いて既知の値については条件付きとして取り扱い、前述の分布形状およびインディケータクリギング手法を用いた。計測されたデータを全ての水理場で既知として固定した場合、その不確実性が減ずるだけではなく、推定を必要とする未知のポイント数も減ずることができ、より現実に近い水理場をシミュレートすることが可能となる。空間的不確実性を表現する方法の一つとして、数値実験的手法であるモンテカルロシミュレーションを併せて用いている。

水理場は、 34×36 の正方形メッシュで、パッカー透水系試験の 2.5m を単位とする $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 要素で構成されている。Figure 3.13 に示すように各水理場の任意の要素に与えられた透水係数について平均・分散を算出した結果、平均・分散ともに 80 ケースの水理場以上で安定している。モンテカルロシミュレーションの場合、不確実性を表現するために有意な情報を得るには、多数の確率論的に等しい水理場（平均、分散、共分散関数）を必要とする。その数についての明確な規定はなく、例えば Cacas らは 20 個のフラクチャーネットワークモデルを、Diverstop らは 30 個のフラクチャーネットワークモデルを対象に解析を行っている。彼らによれば、ネットワークモデルにおいては数 10 個から数 100 個以上となる水理場の場合、膨大な計算時間と作業が必要となる。また、Figure 3.14 に示すように原位置での割れ目密度と透水係数の関係に明瞭な関係が見いだせないことから特にネットワークモデルの有意性を見いだすことはできない。

Figure 3.15 に示す 2 リアリゼーションでは、計測値が下限値を下回らないのに対して、シミュレートした水理場では多くの値が下回っている。Figure 3.16 に示すようにヒストグラム等では、2 山を有する分散を示し、計測値のように正側に振られた形状をしている。計測値とシミュレートした水理場での大きな違いは、シミュレートした水理場が非常に広がって分散を示している点である。計測下限値以下の部分についても対数正規分布を示している。

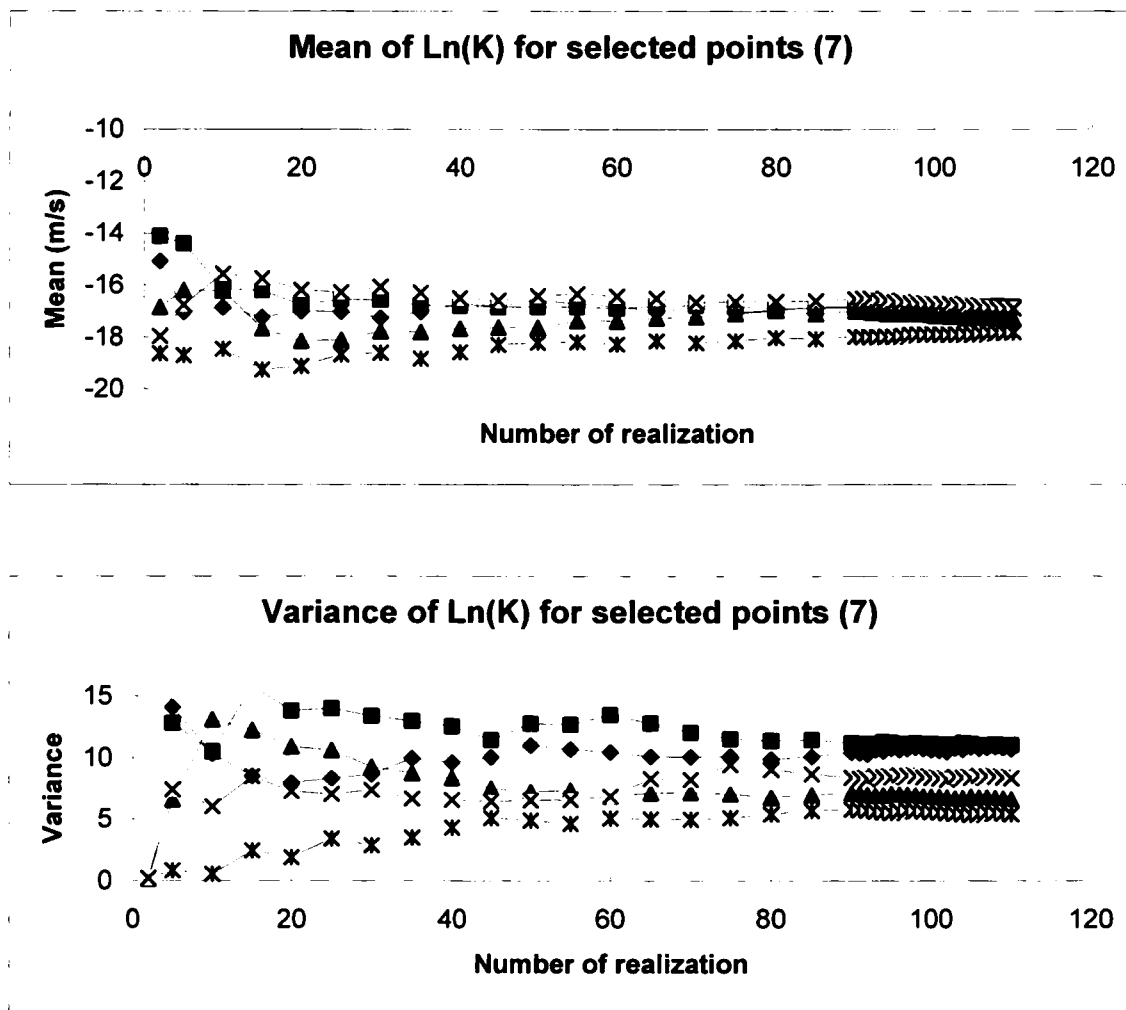


Figure 3.13 100 リアリゼーションの水理場の任意の点における平均と分散の収束性

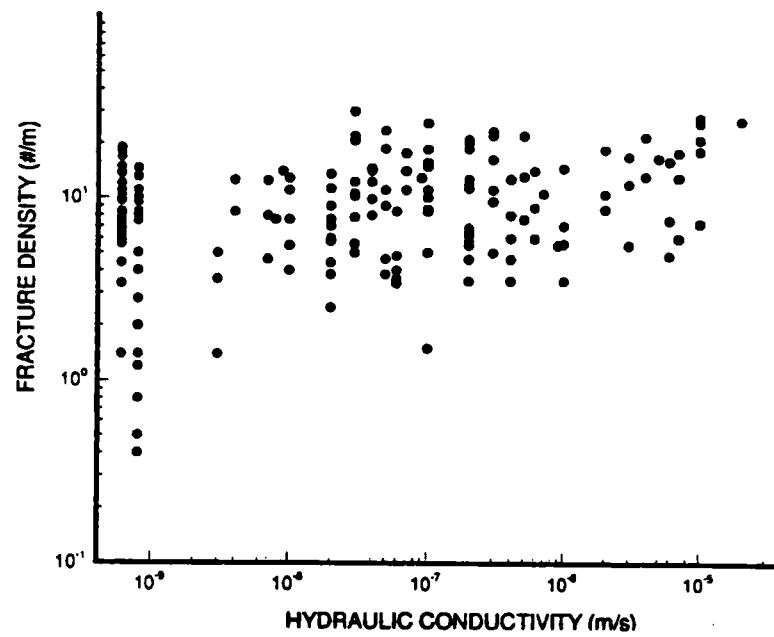


Figure 3. 14 2. 5m 区間の透水係数と割れ目密度（ボーリング孔における単位長さあたりの割れ目の数）の関係

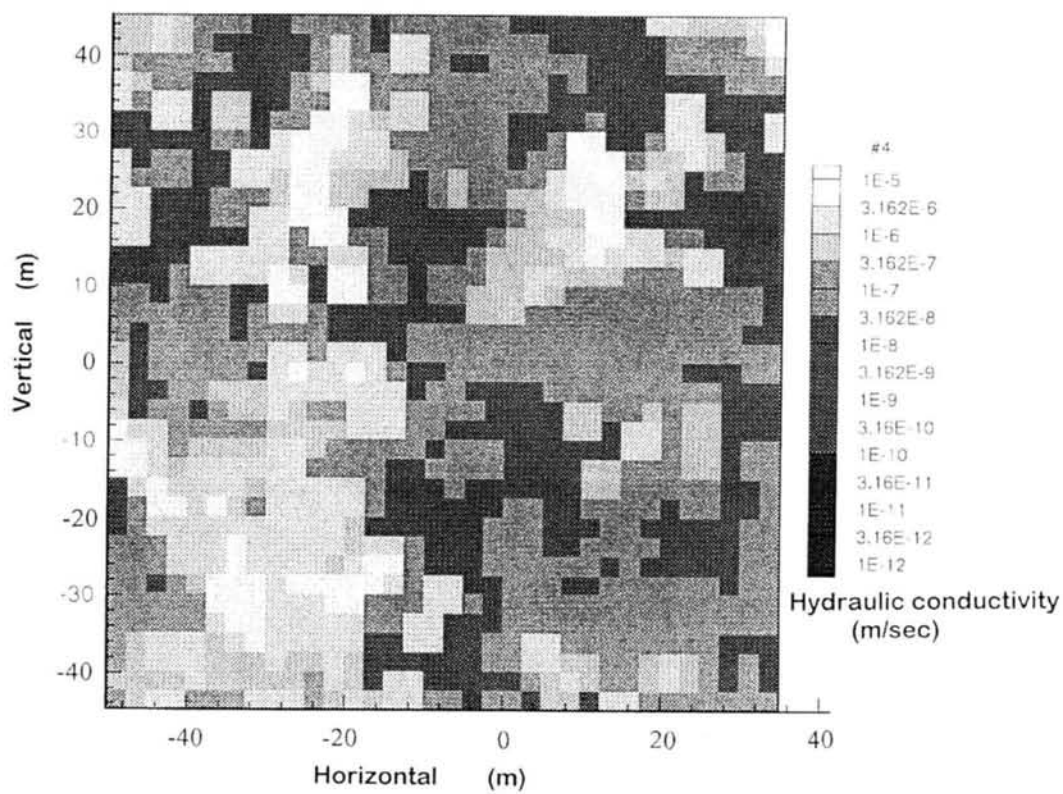
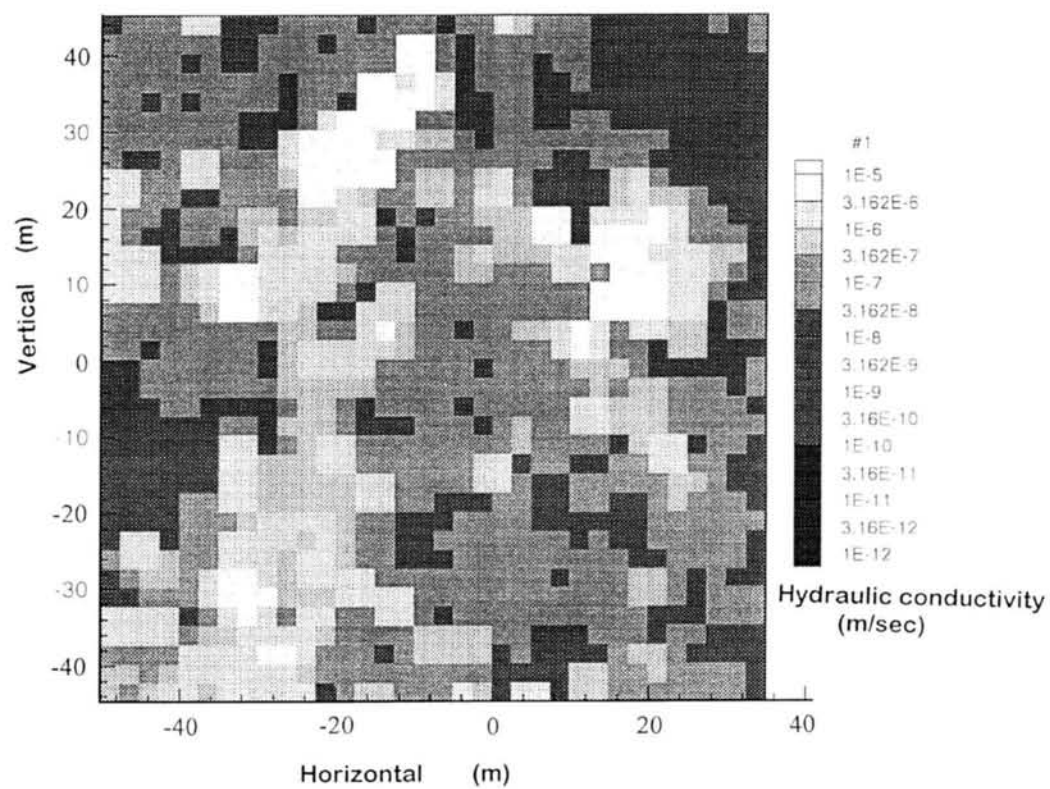


Figure 3.15 2 ケースのランダム透水係数場

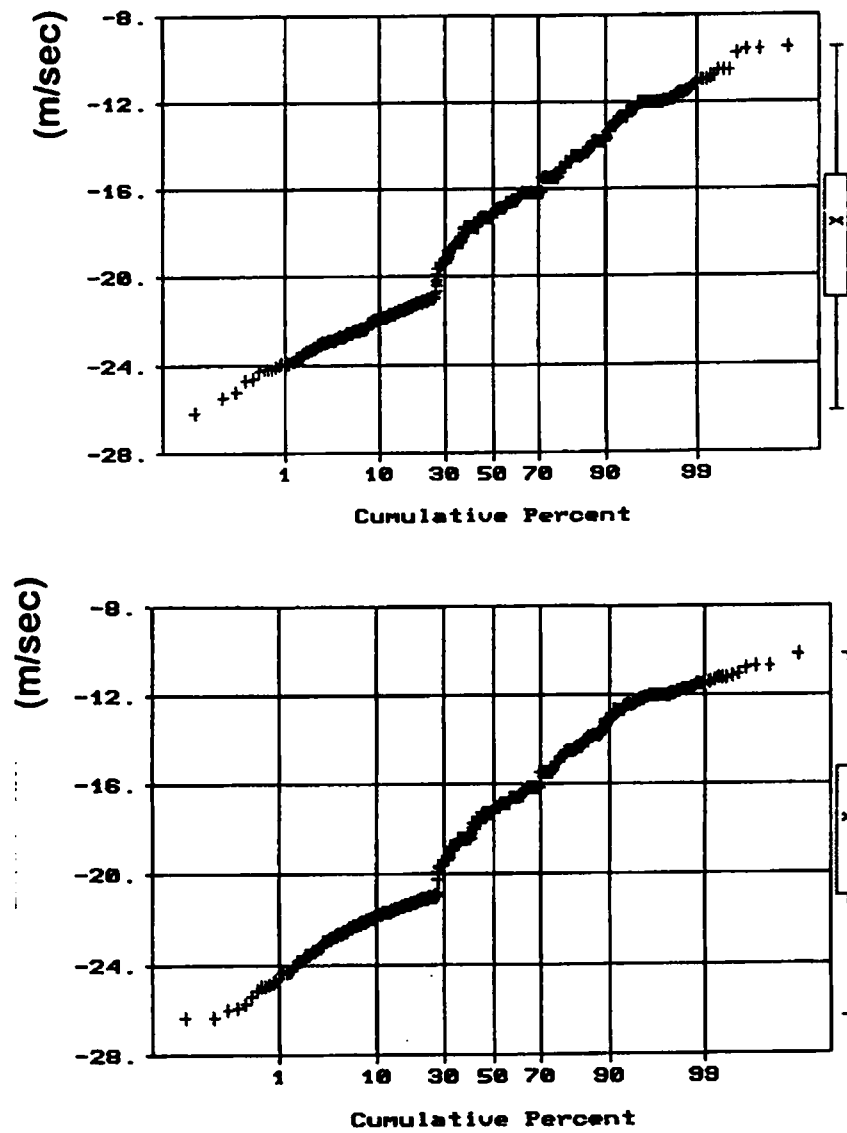


Figure 3.16 Figure 3.14に示す透水係数場の累積分布

3.6 地下水流動解析

本研究では、Fanay-Augères のデータを用いて以下のような理由から飽和領域に絞った地下水流動および物質移行解析を行った。原位置のデータとして、浸透流解析の確認が可能なトンネル湧水量が、飽和領域より供給されること、さらにはトレーサー試験を評価するための物質移行解析において計算が複雑になること、不飽和領域において信頼できるトレーサー試験が行われていないことがあげられる。

3.6.1 解析条件

(1) 境界条件

境界条件は、圧力水頭を用いることにより飽和境界を設定している。また、ボーリング孔掘削前後で異なっているが、ほぼボーリング孔掘削前後を単独に見て、定常状態と仮定した (Figure 3.2 参照)。圧力水頭の推定に当たっては、前述のようにトレンドを除去した残差共相関関数により推定した (Figure 3.17 参照)。圧力水頭の推定に当たっては、水理場と同様に 34×36 要素、 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ メッシュサイズでクリギングを実施した (Figure 3.18 参照)。クリギングによる水頭の推定値は、当然ではあるがボーリング孔から遠ざかるにつれ距離相関性が失われ、推定誤差が大きくなると考えられる。

(2) 解析モデル

圧力水頭から上部および側部の境界条件を水頭固定として設定した浸透流解析モデル (Figure 3.19 参照) において、飽和領域のみを解析領域とした地下水流動解析を行った。解析に当たって、前節で得られた 100 個の水理場のすべてに対して、第 5 節で推定した、異なった時刻の 2 ステージの水頭を境界条件とし、調査用坑道についても圧力水頭をゼロとした。

(3) 解析コード

解析コードは USGS で開発された飽和不飽和浸透流解析コード SUTRA (Voss, 1984) をもとに、各要素単位で桁の異なる透水係数を有するモデルの特徴から接点データでの透水係数の平均の取り扱い方法を修正、変更したコードを作成し、本研究のモデルとした。SUTRA を用いた理由としては、解の安定性に優れ、一般的に用いることのできるコードであり、本研究の目的に合致し手居ると判断した。

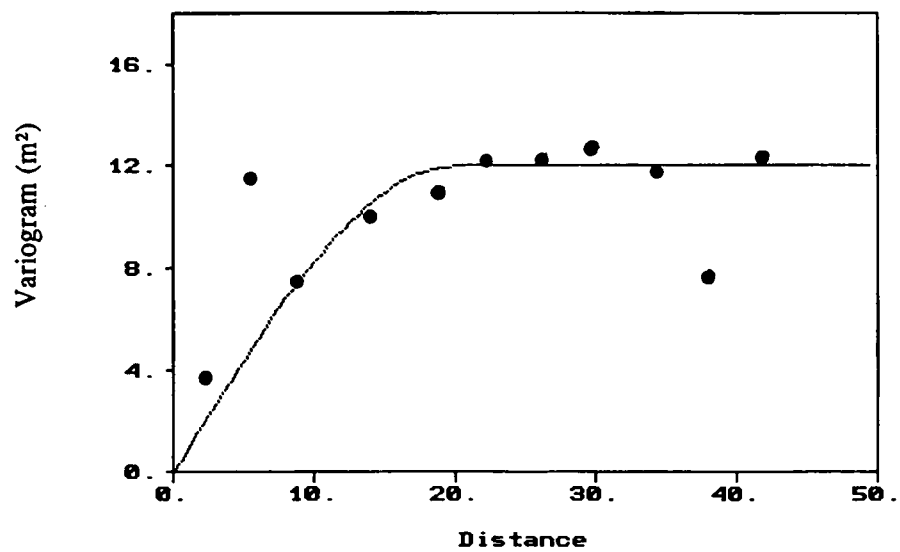


Figure 3.17 2次関数を用いてトレンド補正した水頭の計測値のサンプルバリオグラムとスフェリカルモデルによる全方向バリオグラム

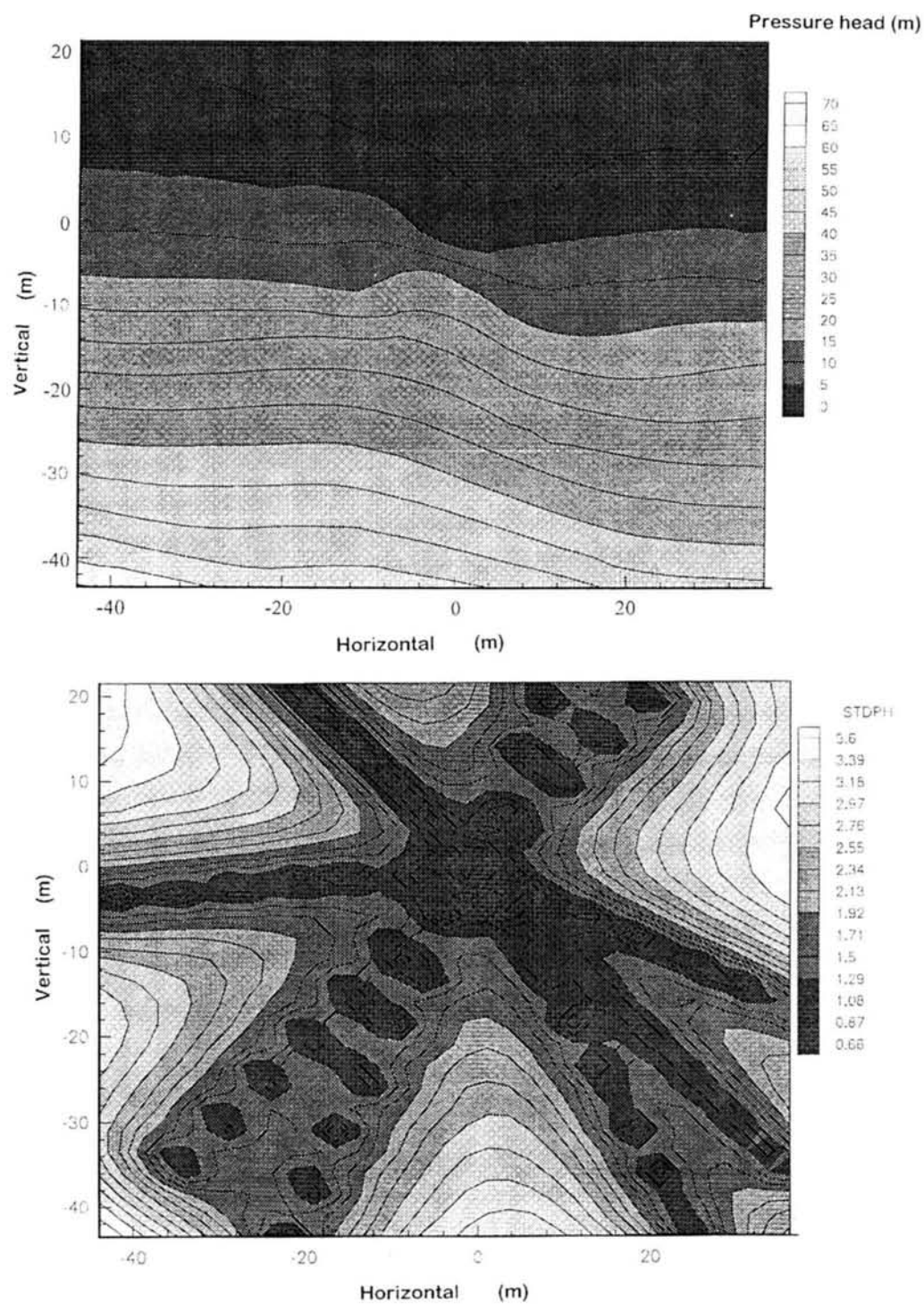


Figure 3.18 水頭のクリギング値（上）とその分散による不確実性評価（下）

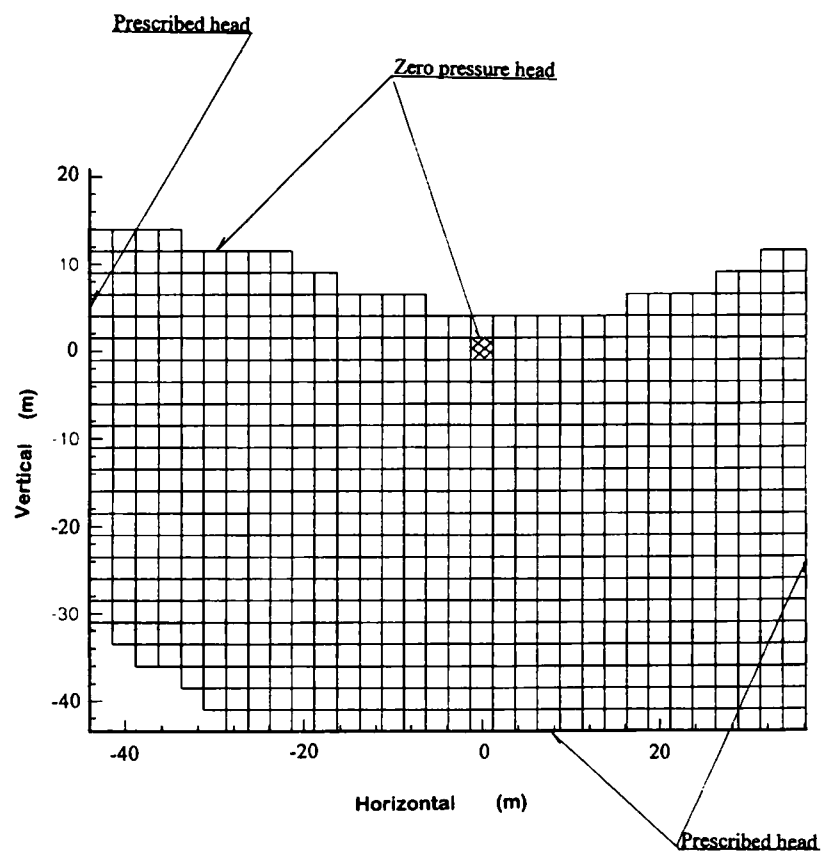


Figure 3.19 地下水流動モデル

3.6.2 地下水流動解析結果

100 リアリゼーションの水理場に対して浸透流解析を行い、流速、水頭、調査坑道への湧水量を評価した。調査用坑道への地下水流入量に着目した場合の結果を Table 3.6 に要約する。表の最下段における計測地下水流入量は、坑道 100 m の地下水湧水の総計を毎分の量で示している。また、Figure 3.20 に Stage-1 における地下水流入量の解析結果のヒストグラムと、Stage-2 におけるヒストグラムを示す。計測値は 2.42 l/min (September 1985) であるステージ 1 および 1.48 l/min (December 1985) であるステージ 2 における 2 ケースの境界条件下での湧水量の解析結果の幾何平均は、各々 2.09 l/min と 1.56 l/min である。Stage-1 においては、平均値が 10.09 l/min、最小値が 1.57 l/min、最大値 34.49 l/min、Stage-2 においては平均値が 5.97 l/min、最小値が 0.73 l/min、最大値 23.18 l/min となっている。両ステージにおいて流入量は計測値より大きくでているものの解析値の分散において、特にヒストグラムにおける最頻度の領域に計測値が位置している。

個別の水理場の浸透流解析を行った結果の評価項目として、計測で得られた水頭のシミュレーション結果との比較並びに計測された調査用坑道への地下水流入量と解析結果の比較の 2 点とする。

Table 3.7 と Table 3.8 に水頭についての比較（解析した水頭と計測水頭から直接クリギングした水頭の差および解析した水頭と計測水頭の差）を 5 個の水理場（水理場の番号 15, 41, 48, 72, 95）に対して行った。この 5 種類の水理場が計測されたトンネルへの湧水および計測された水頭との比較において、よい一致をみた。圧力水頭および全水頭の解析結果（48 番目の水理場に対する 1 ステージの結果の例示）を Figure 3.21 に示す。特に第 48 水理場が最も計測されたトンネルへの湧水および計測された水頭との比較において最も近い値を示した（Figure 3.22）。Figure 3.23 に示す解析結果と計測結果の水頭差は十分受け入れられると判断する。なお、Cacas 他（1990a）による割れ目ネットワークモデルのけるこのような比較は行われていない。計測値との差は、平均して 1 m 強あり、平均値は Stage-1 が若干小さく Stage-2 の方が分散はやや小さい結果となった。

参考のため、100 個の水理場の同じ位置の 100 個の透水係数を各々に幾何平均した水理場を構築し、地下水流動解析についても行った結果、第 1 ステージで 2.14 l/min、第 2 ステージで 1.35 l/min となり計測値に非常に近い値となった。この水理場においても、本研究で用いたコンディショナルシミュレーションが、計測値をどの水理場においても条件として保存しているため、同様に計測値は固定され、その他の要素においては、平均化されている。なお、次ステップである物質移行解析には、この水理場（水理場番号 48）を用いることとする。

Table 3.6 調査坑道への湧水量の統計 (in l/min)

	Stage-1	Stage-2
100 リアリゼーションの平均	10.09	5.97
100 リアリゼーションの最大	34.49	23.18
100 リアリゼーションの最小	1.57	0.73
100 リアリゼーションの中央値	8.25	4.90
100 リアリゼーションのモード	2 to 8	1 to 5
幾何平均透水係数場を用いた湧水量	2.14	1.35
計測値	2.42	1.48

Table 3.7 圧力水頭のクリギング値と地下水流動解析値の差 (m)

リアリゼーション	#15		#41		#48		#72		#95	
Stage	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
平均	0.77	0.95	1.19	1.26	1.30	1.29	1.251	1.28	1.19	1.19
分散	2.39	1.78	3.09	2.42	2.72	2.13	1.89	1.58	3.17	2.25
最大	3.73	3.80	5.07	5.45	5.09	4.32	5.587	4.77	4.54	4.05
最小	-4.90	-3.34	-4.91	-3.81	-4.70	-3.49	-2.52	-2.23	-4.28	-2.64

Table 3.8 圧力水頭の計測値と地下水流動解析値の差 (m)

リアリゼーション	#15		#18		#48		#72		#95	
Stage	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
平均	1.00	1.30	1.00	1.27	1.00	1.38	1.55	1.71	1.60	1.68
分散	4.70	2.95	6.38	2.09	6.83	1.96	1.55	1.72	5.13	3.44
最大	3.70	3.65	4.67	5.40	4.77	4.12	4.30	3.78	4.48	4.18
最小	-6.52	-4.62	-9.07	-6.82	-6.89	-4.82	-2.96	-1.72	-5.26	-3.52

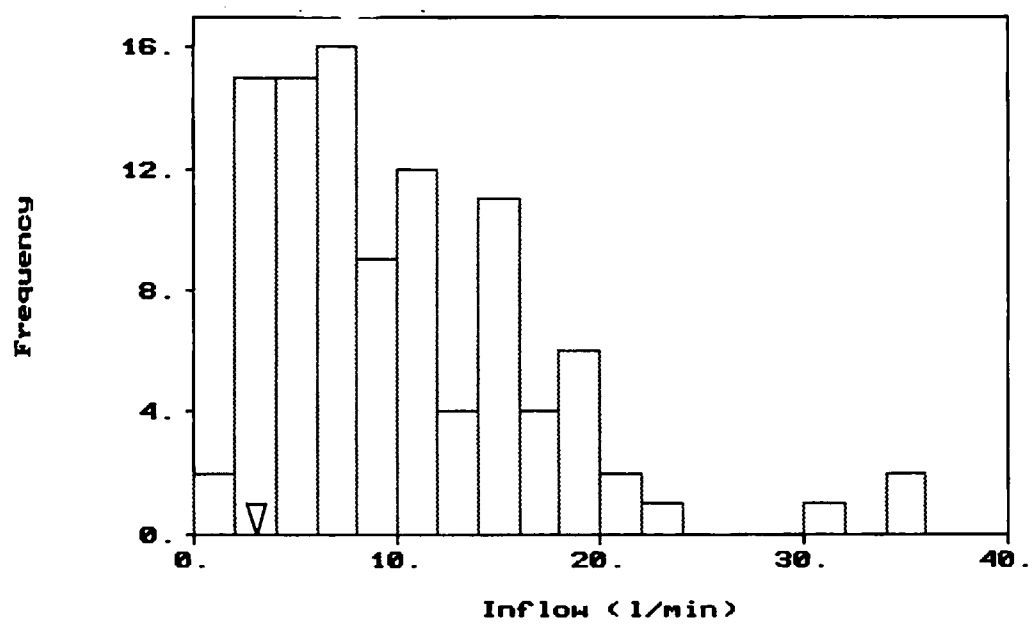
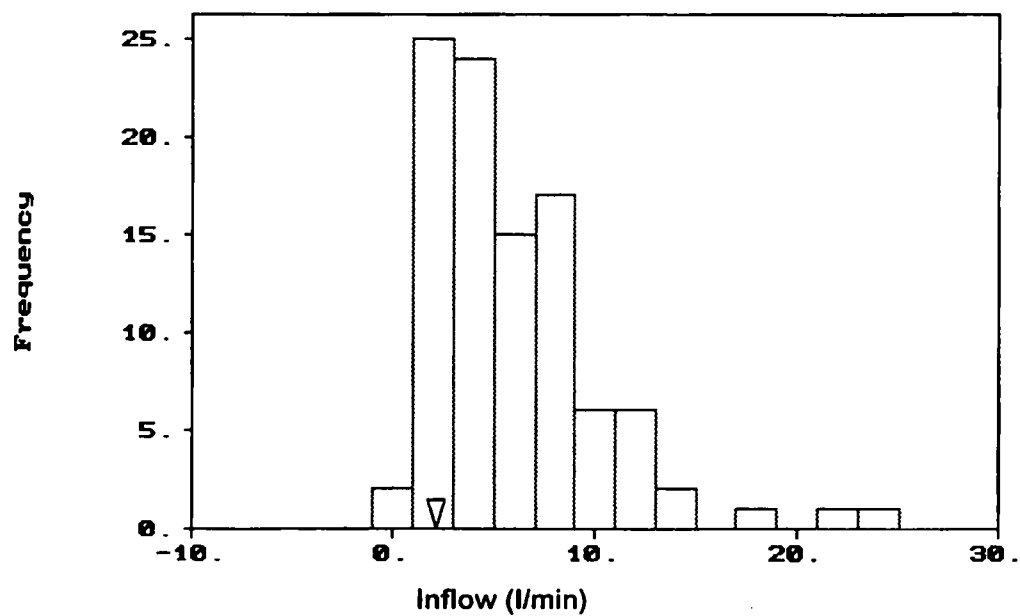


Figure 3.20 ステージ1およびステージ2 調査坑道への湧水量の解析結果のヒストグラム
(100 リアリゼーション) なお、▽ は、計測値

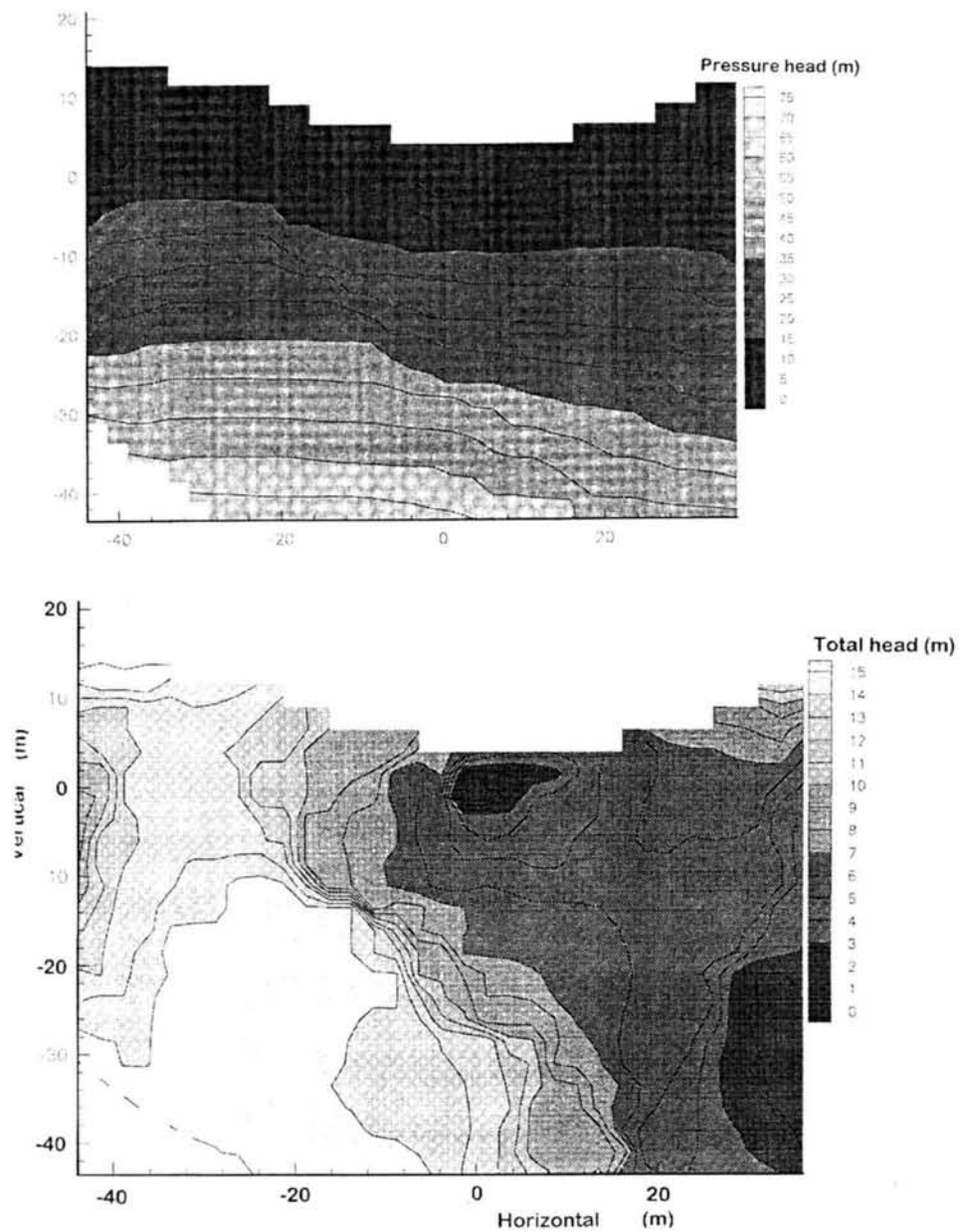


Figure 3.21 第48ケースの条件付シミュレーションにおける地下水流動解析結果の間隙水圧および全水頭（ステージ1）

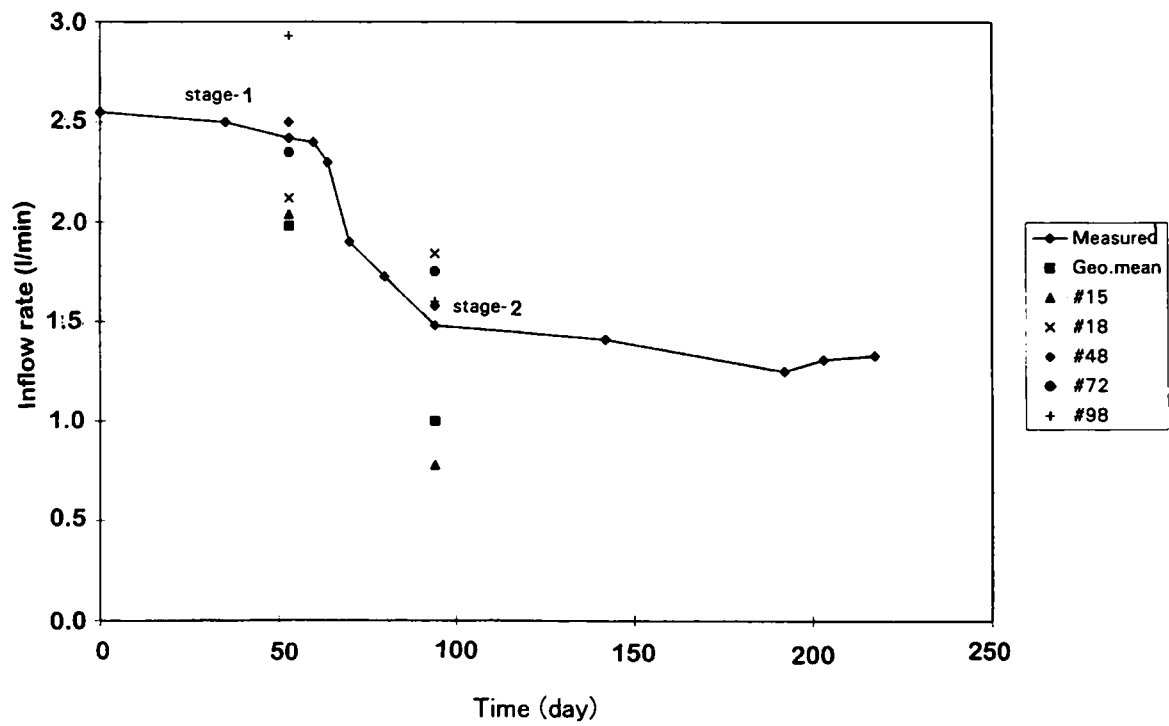


Figure 3.22 調査坑道への湧水量の計測値および代表的な解析結果

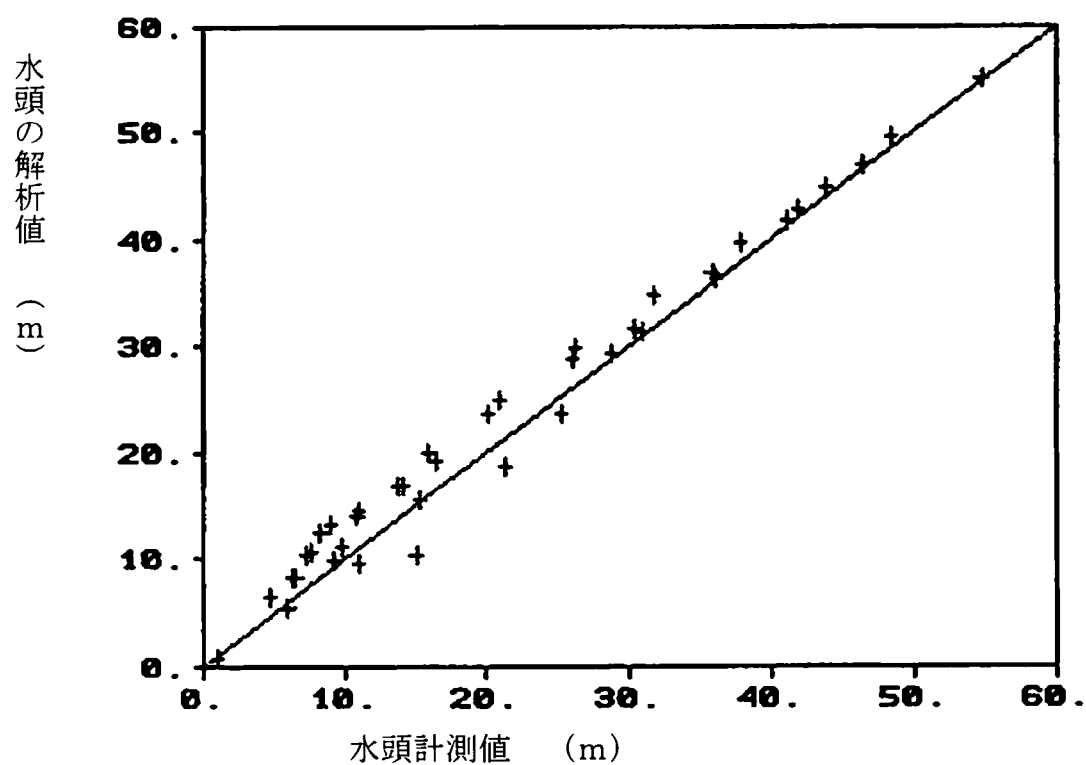
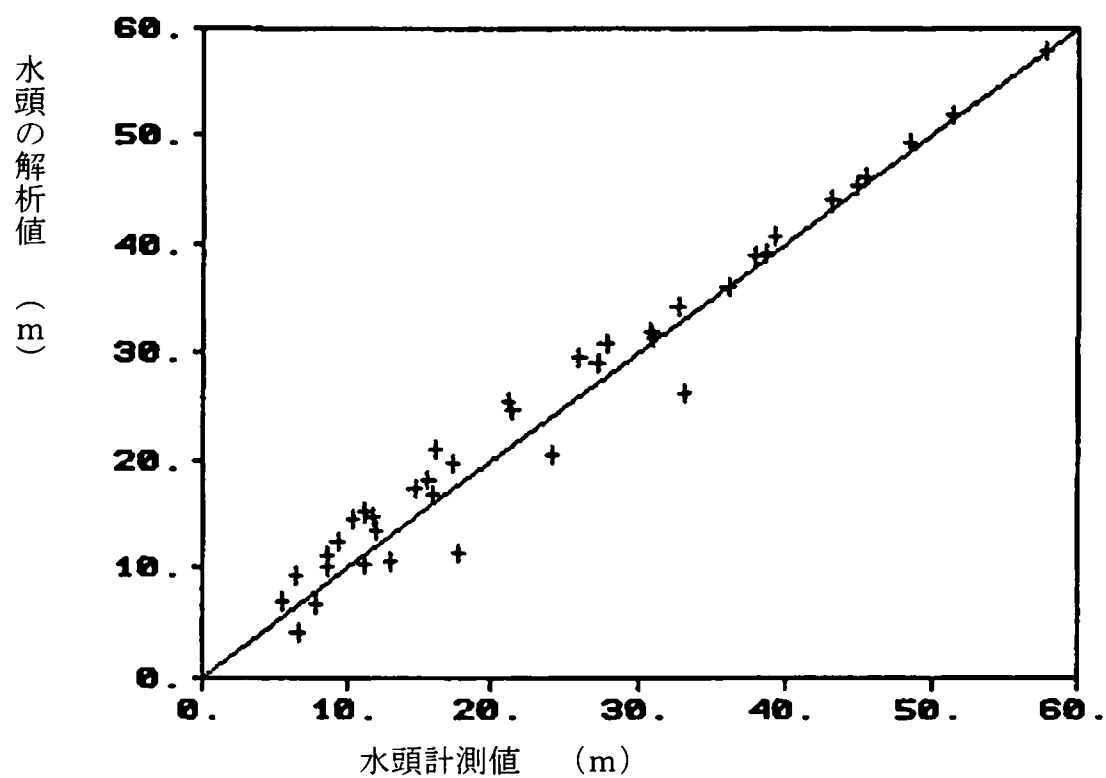


Figure 3.23 ステージ1 (上) およびステージ2 (下) における水頭の計測値と解析結果の比較 (第48番目の透水係数場)

3.7 物質移行解析

Fanay-Augères におけるトレーサー試験では、精度のよいデータが十分取得されている 4 試験 (3F3、4F3、6F3 および 7F2、Cacas 他 (1990b)) に着目して、物質移行解析における本研究の適用性評価を行った。また、Cacas ら (1990b) によって利用された 6F2 については、データの信頼性が低いこと、不飽和領域での試験であることから除外した。また、物質移行解析は、USGS において開発された公開コード SUTRA を本研究用に改良して利用した。

3.7.1 物質移行に用いる水理場の選定

前節までの地下水流動解析結果より、計測されたトンネルへの湧水量および水頭を最もよく再現している 1 個の水理場 (48 番目の水理場) を物質移行解析に用いることとした。また、境界条件は、解析対象のトレーサー試験の実施された期間を考慮して、設定した。

Figure 3.2 に示されるように、地下水流動は、2 区間のほぼ定常な状態とその間を結ぶ非定常な流動場によって表現でき、トレーサー試験期間についても Figure 3.2 に示される期間に実施されている。トレーサーは、初期の 30 分間に注入されており、その後モニタリングされている。

解析モデルは、地下水移流問題を解析したモデルと同じものを用い、トレーサー注入位置にあたる要素にトレーサー相当の濃度を注入、トンネルへの湧水における濃度を解析的に評価した。

3.7.2 物質移行解析

前述のように物質移行解析を行うにあたり、ここでは 3F3、4F3、6F3 および 7F2 の 4 種類のトレーサー試験に着目した。Cacas ら (1990b) によれば、この 4 つのトレーサー試験が全てのトレーサー試験の中で最も信頼性が高く、定量評価が可能であるとしている。Cacas らが実施した割れ目ネットワークモデルでは、解析コードの制約より、比較的小さい岩盤スケールに縛れていることから 3F3 試験のモデル化を行わず、注入位置及び移行経路が不飽和領域と思われる、6F2 試験を分析している。連続体モデルでは、個々の割れ目もモデル化する必要が無く、かつ 2 次元モデルとしていることから、そうしたモデル制約が無く、3F3 についてもモデル化した。

3F3、4F3、6F3 および 7F2 の 4 トレーサ試験の実施期間とトンネルへの湧水量について Figure 3.2 に示す。トレーサーの注入時間は、30 分となっている。4F3 と 7F2 トレーサー試験は、期間中湧水量が非定常を示しているが、前述の 2 定常期間 (ステージ 1 および 2) から直線的に内挿し、境界条件を設定した。

物質移行解析においても地下水流動解析と同様の解析コードである SUTRA を用い、Figure

3.19 に示す解析メッシュでシミュレーションを実施した。本研究では、2次元断面モデルを適用したため、奥行き方向への拡散分散は、考慮できない。例えば、7F2 トレーサ試験では、2次元断面的にみると注入場所からトンネルまで5mであるが、原位置でのトレーサ観察は、トンネル延長方向に20m区間で計測されたため、5m から25.5mまでの区間の平均的な移行時間、ピーク到達速度となっていると考えられる。ただし、トレーサ計測においても奥行き方向の総和としての計測を行っているため、3次元解析を行う程の分解能を有していない。

3.7.3 物質移行パラメータの同定

物質移行特性を評価する上で、地下水流動解析用のパラメータに加えて、有効間隙率、縦方向分散係数、横方向分散係数を必要とする。Maloszewski と Zuber (1993)は、この試験における有効間隙率を間接的な手法を用いて 1.25×10^{-4} から 1.10×10^{-3} と算出した。本研究では、有効間隙率および縦方向および横方向分散係数の取得を以下の3ステップで行った。

- 1) トレーサが非吸着性であることから、まず有効間隙率を算出し、適当な分散係数を想定した。
- 2) 縦方向および横方向分散係数を修正し、ブレイクスルーカーブに一致させる。
- 3) 1) と2) を繰り返す。

最終的には、Table 3.9 に示す特性値を得た。

Table 3.9 キャリブレーションした物質移行特性値

Tracer Number	Longitudinal Dispersivity (m)	Transverse Dispersivity /Longitudinal Dispersivity	Effective porosity
6F3	17.5	1/10	8.0E-3
4F3	17.5	1/10	8.0E-4
3F3	17.5	1/10	6.0E-4
7F2	17.5	1/10	4.0E-4

3.7.4 物質移行解析結果と原位置データの比較

Figure 3.24 に 6F3, 4F3, 3F3 7F2 の4トレーサ試験のシミュレートした結果と原位置での試験結果の比較を示す。また、Table 3.10 及び Table 3.11 にピーク到達時間および25%、50%到達時間を比較する。4F3 と 3F3 のブレイクスルーカーブのデータは、フロエセンより得た。最終的にベストフィットした4トレーサ試験の各々の有効間隙率として、 8.0×10^{-3} , 8.0×10^{-4} , 6.0×10^{-4} , 4.0×10^{-4} が得られ、最初の1個を除いて、Maloszewski と Zuber (1993)が提案した有効間隙率の範囲内にあった。6F3 において、大きな有効間隙率が得られた理由としては、チャンネル構造や破碎対等の高い透水性を有する構造があったのではないかと考える。縦方向分散長は、17.5m で横方向分散長は縦方向分散長の 1/10 とした。ここで、得られた高い分散長は、トンネル奥行き方向の3次元的な流動およびトレーサの移行を2次元断面モデルで評価したことに大きく起因していると考ええる。

Cacas *et al.* (1990b) らは、解析結果のブレイクスルーカーブを示していないことからブレイクスルーカーブを直接比較せずトレーサのブレイクスルーカーブのピーク到達時間を比較した結果(Table 3.10 参照)、本研究で解析した2次元確率論的連続体解析は、少なくとも3次元割れ目ネットワーク解析と同レベルの結果が得られることがわかった。

Table 3.10 トレーサー濃度がピークとなる時間の比較

Tracer Number	Simulated peak arrival time (hr)	Measured peak arrival time (hr)	Peak arrival time from Cacas et al. (hr)
6F3	748	757	1 to 900
4F3	179	199	27 to 14900
3F3	236	274	Out of computation
7F2	59	44.5	0.1 to 550

Table 3.11 トレーサー濃度のピーク値の25%、50%となる時間の比較

Tracer Number	Simulated 50% duration (hr)	Observed 50% duration (hr)	Simulated 25% duration (hr)	Observed 25% duration (hr)
6F3	-	1621	-	Not measured
4F3	508	465	820	870
3F3	676	605	1070	1170
7F2	190	150	325	285

-: 解析時間を超えている。

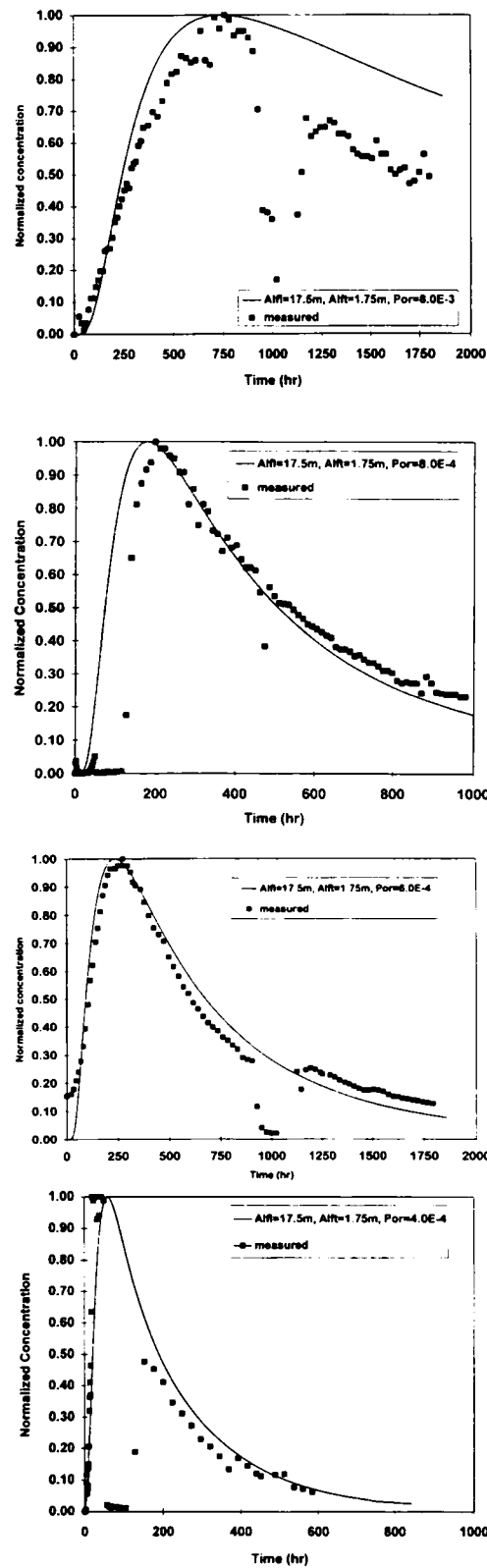


Figure 3.24 原位置トレーサー試験と解析結果の比較

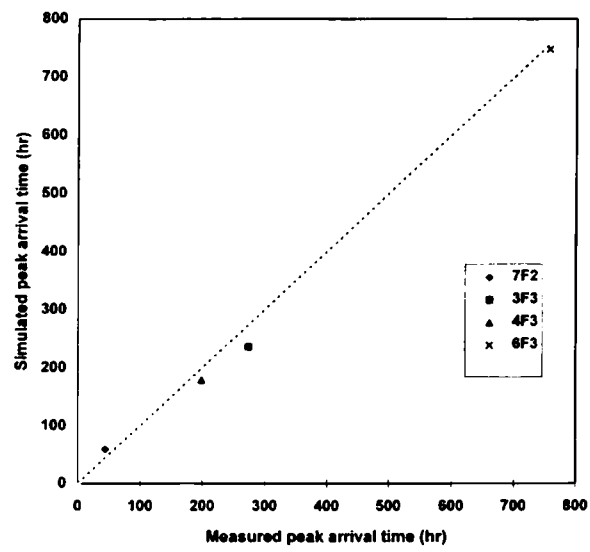


Figure 3.25 トレーサー試験の最大濃度到達時間の解析結果と計測値の比較

3.8 まとめ

本研究では、亀裂性岩盤である結晶質岩中の地下水流動および物質移行を評価することを目的として、測定された圧力水頭をもとにトンネル周辺を対象とした局所的なモデル（ニアフィールドモデル）の境界条件を設定することに成功した。さらに、インディケータコンディショナルシミュレーションにより、透水試験結果の内 1/3 が計測下限値以下の原位置データを有効活用した不均質かつ確率論的に等しい 100 個の水理場をシミュレートした。結果、下限値以下のデータを含む水理場を得ることができた。これらの境界条件と水理場を対象として、浸透流解析を行い、実測の水頭、調査トンネルへの湧水量を比較し、良好な一致を見た。

さらに、物質移行を評価するために原位置で実施されたトレーサ試験を解析的に評価した。評価に当たっては、上述の 100 個の水理場から原位置で得られたトンネルへの湧水量と最も近い水理場を選定し、4 トレーサ試験に対して解析を行い、原位置で計測されたブレイクスルーカーブとの比較を行い、有効間隙率および縦方向、横方向分散長を推定した。これらのデータを用いて原位置で得られたブレイクスルーカーブを再現することが出来た。

また、本研究とは異なった手法である割れ目系ネットワークモデルの結果と比較することで、以下の点について本手法を評価することができた。

- ①本研究は、確率論的連続体モデルをフランスの Fanay-Augères ウラン鉱山における花崗岩を対象としたトンネルでの地下水の流動および物質の移流分散に関わる原位置試験に適用、十分に信頼できる結果を得られた。これは、花崗岩のような亀裂性岩盤を対象とした場合、割れ目ネットワークモデルのみが解析可能とする考えに対して十分反論できる結果であると考ええる。
- ②本研究で用いた手法は、割れ目系の詳細なデータ（開口幅、形状、角度、連続性）を必要とせず、取り扱いが容易で複雑な仮定を必要としない。ここで、言う複雑な仮定とは、例えば割れ目の奥行き方向の連続性など見えない部分の仮定を言う。
- ③本研究は、割れ目ネットワークモデルの結果と比較することで、効率的なモデル化により最小限の原位置情報と作業時間で割れ目ネットワークモデルのような複雑なモデルと同様な結果を得ることが出来る事を示した。

参考文献

- Cacas, M.C., E. Ledoux, G. de Marsily, A. Barbreau, P. Calmels, B. Gaillard, and R. Margritta, Modelling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation, 1, The flow model, *Water Resour. Res.*, 26(3), 479-489, 1990a.
- Cacas, M.C., E. Ledoux, G. de Marsily, A. Barbreau, P. Calmels, B. Gaillard, and R. Margritta, Modelling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation, 2, The transport model, *Water Resour. Res.*, 26(3), 491-500, 1990b.
- Chen, G., W.A. Illman, D.L. Thompson, V.V. Vesselinov, and S.P. Neuman, Geostatistical, type curve and inverse analyses of pneumatic injection tests in unsaturated fractured tuffs at the Apache Leap Research Site near Superior, Arizona, pp. 73-98 in *Dynamics of Flow and Transport in Fractured Rocks*, edited by B. Faybishenko et al., AGU monograph series, 2000.
- Deutsch, C. V., and A. G. Journel, *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford Univ. Press, New York, 1998.
- Gómez-Hernández, J. J. and R. M. Srivastava, ISIM3D: An ANSI-C three-dimensional multiple indicator conditional simulation program, *Computers and Geosciences*, 16(4), 395-440, 1990.
- Gómez-Hernández, J. J., A. Sahuquillo, and J. E. Capilla, Stochastic simulation of transmissivity fields conditional to both transmissivity and piezometric data, 1. Theory, *Jour. Hydrology*, 203, 162-174, 1997.
- Gómez-Hernández, J. J., H. J. W. M. Hendricks Franssen, and A. Sahuquillo, Calibration of 3-D transient groundwater flow models for fractured rock, pp. 185-194 in *Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: Coping with Uncertainty, ModelCARE 99*, edited by F. Stauffer, W. Kinzelbach, K. Kovar and E. Hoehn, IAHS Publication no. 265, IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK, 2000.
- Gómez-Hernández, J. J., H. J. W. M. Hendricks Franssen, and A. Sahuquillo, Sequential self-calibrating multiple realizations to flow and transport data, *Proc. 4th Intern. Conf. on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling (ModelCARE 2002)*, edited by K. Kovar and Z. Hrkál, Charles University, Prague, Czech Republic, 320-323, 2002.
- Hyun, Y., S. P. Neuman, V. V. Vesselinov, W. A. Illman, D. M. Illman, D. M. Tartakovsky, and V. Di Federico, Theoretical interpretation of a pronounced permeability scale effect in unsaturated fractured tuff, *Water Resour. Res.*, 38(6), 2002.

- Kostner, A., Geostatistical and Numerical Analysis of Flow In a Crystalline Rock Mass, M. S. thesis, Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson, Arizona, 1993.
- Maloszewski, P. and A. Zuber, Tracer experiments in fractured rock: Matrix diffusion and validity of model, *Water Resour. Res.*, 29(8), 2723-2735, 1993.
- Neuman, S.P., Stochastic Continuum Representation of Fractured Rock Permeability as an Alternative to the REV and Fracture Network Concepts, in *Rock Mechanics: Proceedings of the 28th U. S. Symposium*, Tucson, Arizona, edited by I.W. Farmer, J.J.K. Daemen, C.S. Desai, C.E. Glass, and S.P. Neuman, A.A. Balkema, Rotterdam, 533-561, 1987.
- Neuman, S.P., A Proposed Conceptual Framework and Methodology for Investigating Flow and Transport in Swedish Crystalline Rocks, Arbetsrapport 88-37, 39 p., SKB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm, September, 1988.
- Neuman, S.P. and J.S. Depner, Use of Variable-Scale Pressure Test Data to Estimate the Log Hydraulic Conductivity Covariance and Dispersivity of Fractured Granites Near Oracle, Arizona, *J. Hydrology*, 102, 475-501, 1988.
- Neuman, S.P., Stochastic approach to subsurface flow and transport: A view to the future, pp. 231-241 in Dagan, G. and S.P. Neuman (editors), *Subsurface Flow and Transport: A Stochastic Approach*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1997.
- Vesselinov, V.V., S.P. Neuman, and W.A. Illman, Three-dimensional numerical inversion of pneumatic cross-hole tests in unsaturated fractured tuff: 2. Equivalent parameters, high-resolution stochastic imaging and scale effects, *Water Resour. Res.*, 37(12), 3019-3042, 2001.
- Voss, C. I., SUTRA User' s Mannual, U.S. Geological Survey, 1984
- Voss C. I., SUTRA Additional Mannual for Ver. 0690-2D, U.S.Geological Survey, 1990.

第4章 亀裂性岩盤における物質移行特性の確率論的評価

4.1 概要

放射性廃棄物処分において、岩盤が有効な天然バリアとしての機能を果たすことが知られている。この際、水理地質構造の評価が重要であり、これらの特性を得るために原位置試験および室内試験が実施される。さらにそうした情報を集約し、性能評価のために適切な簡略化がなされ、評価が実施される。例えば、NAGRA（スイス放射性廃棄物処分組合）では、亀裂性岩盤を対象とした地下水流動及び物質の移行問題を対象として、しばしば割れ目を並行平板あるいはパイプに概念モデル化される（Figure 4.1、Figure 4.2 参照）。サイト特性評価において、透水試験やその後のトレーサー試験などの原位置試験の一連の調査を行い、各種の透水特性や物質移行特性を得るが、例えば吸着等による物質移行の遅延が起こらないとさせている非吸着性トレーサーを用いた場合においても透水性から予測するトレーサーの移行速度より原位置で得られる移行速度は遅い結果が得られる。これは、物質移行を評価するための間隙率（地下水量）は、割れ目の大きさや表面の不均質性から透水性から求まる間隙率（並行平板モデルの開口幅あるいはパイプモデルにおけるパイプ半径から求まる）より大きくなることを示したものである。例えば、Cacas らは(1990a、1990b)、パイプネットワークモデルを用いて、地下水流動および物質移行を解析している。その中で、地下水流動と物質移行における水の流れの速度の違いを評価した“トレーサーを評価する遅延係数”とし、“ C_r （遅延係数）=32 は、同じ透水性を持つパイプにおいて、現実には平均的に32倍の地下水の量を有することを意味する”と説明している。

他方、平行平板モデルにおいて、物質移行における有効間隙率の増大は割れ目の不均質性あるいは開口幅の変化に理論的に関係する事が示されている（Gelhare, 1997）。

そこで、本研究では、割れ目のモデルの一つであるパイプモデルにおいて透水性を支配する抵抗から得られるみかけの有効間隙率と物質移行を支配する流量から得られる有効間隙率の関係を理論的に示すことを目的とする。

後述の理論展開において、原位置試験で得られる透水性に関する情報を中心に検討を進める。パイプモデルにおいて、物質移行と地下水流動との関係が強い、あるいはその比が大きい事を示すが、パイプや平行平板等の概念モデルは、現実の単純化の中で概念化され、本研究が物質移行における特性値の意味が何か、どう用いるべきかを示す指針になるものとする。

特に、亀裂が透水性を支配すると考えられる低透水性岩盤におけるサイト特性評価の初期の段階で孔間透水試験や孔間のトレーサ試験等の原位置試験を計画する際や結果を評価する際に独立したデータからの類推値が存在することは非常に有益と考える。そこで、原

位置あるいは岩盤のサンプルより得られる透水性に関する情報を基に物質移行の特性について定量的に評価した。

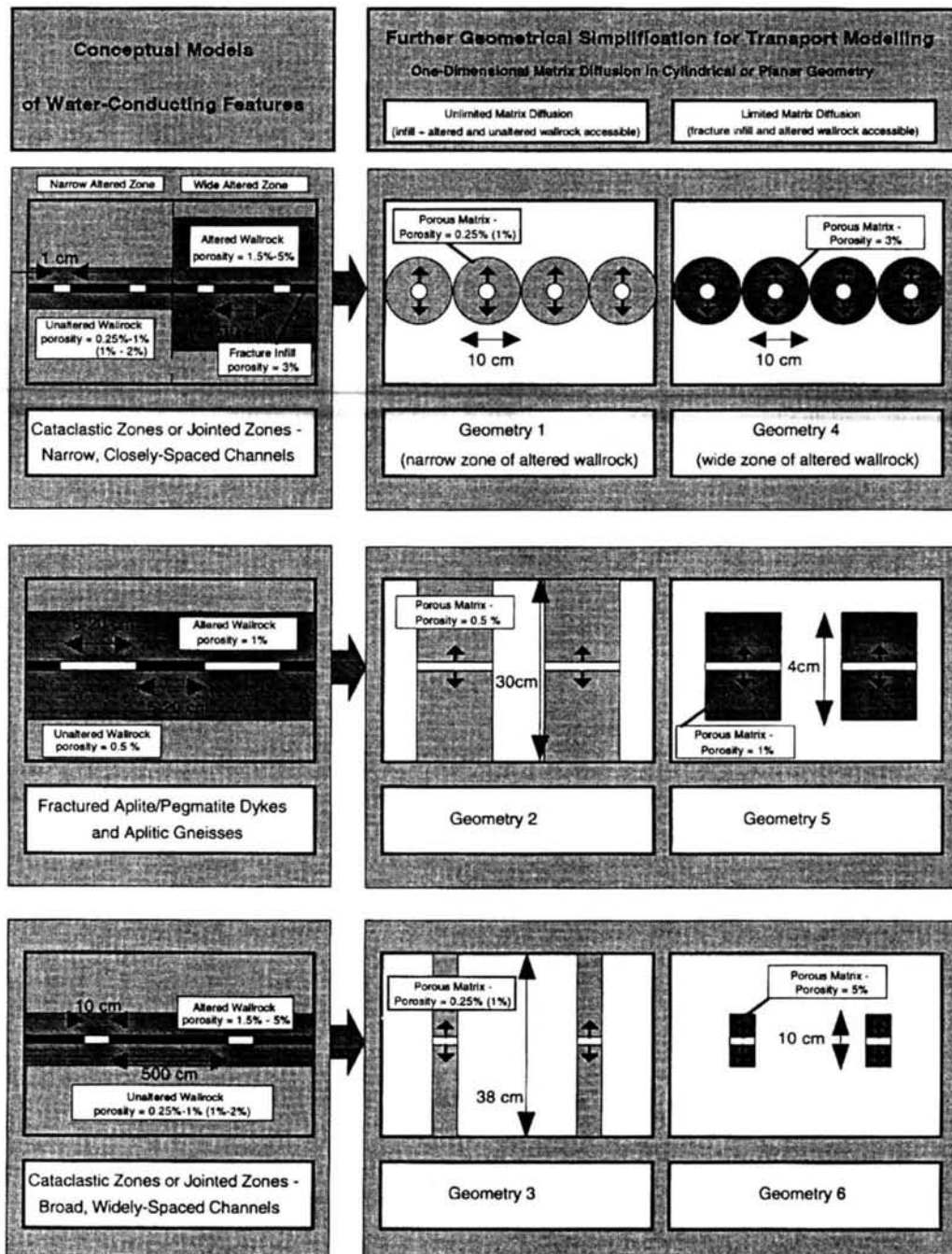


Figure 4.1 花崗岩を対象とした亀裂性岩盤における透水性割れ目の概念モデル (NAGRA, NTB93-22)

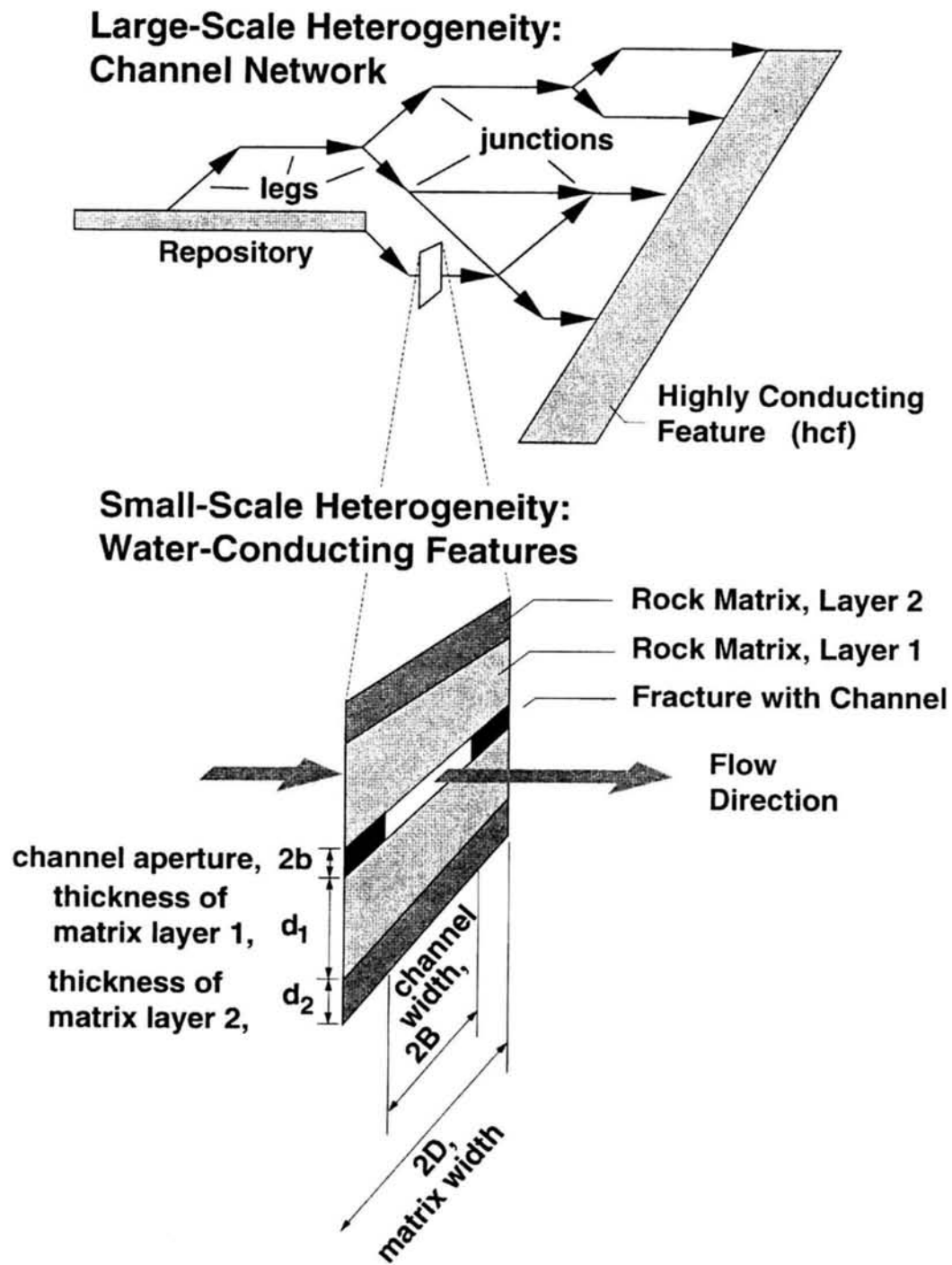


Figure 4.2 割れ目内部の概念モデル (NAGRA, NTB93-26)

4.2 割れ目のモデル化の基礎式

前述したように割れ目を単純化する場合、パイプや平行平板としてモデル化されるが、計測した透水係数との整合性をとる。この節ではパイプによるモデル化について導入する。まず、地下水流動を評価するパイプモデルは、一次元の流動を想定し、パイプは相互につながることはないと仮定すると流れの基本則は、

$$Q = -\pi r^2 \frac{\gamma}{8\mu} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (4-1)$$

となる。

ここに、

Q : 地下水流れ (m³/s);

r : パイプモデルの半径 (m);

γ : 重力項 (m/s²);

μ : 粘性項 (m²/s);

φ : 水頭 (m);

x : パイプ軸方向座標 (m)

を示す。

なお、パイプは変形せず、水は非圧縮と仮定する。本来、(1)式は、一定の直径のパイプの厳密解であるが、本節では局所的に成立すると仮定する。

質量保存則については、

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4-2)$$

とし、パイプに沿った流量は一定であることを意味する。物質移行を検討するための移流分散式は、

$$\pi r^2 \frac{\partial c}{\partial t} + Q \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0 \quad (4-3)$$

とする。ここに、

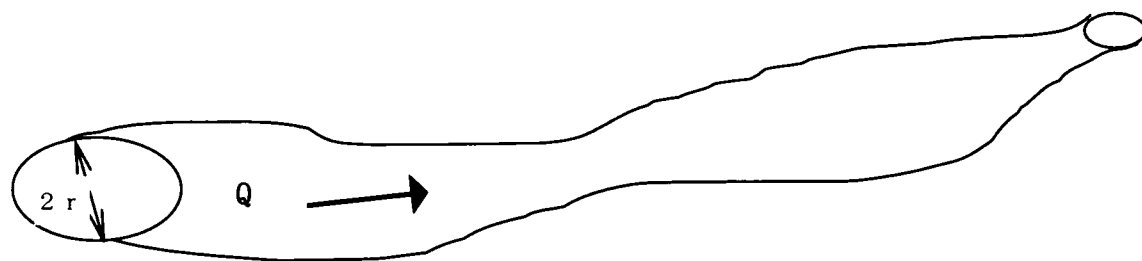
c : 濃度 (M/m³);

t : 時間 (s);

D : 分散係数 (m²/s)

を示す。なお、本節では、マトリックス拡散および吸着に関しては、考慮していない。後

述の節において、別途マトリックス拡散は、検討を行うものとする。



半径 r

Figure 4.3 パイプモデルの概念

4.3 地下水流動評価

本節では、地下水流動を確率論的にパイプモデルを用いて評価する。評価の仮定として、割れ目を模擬したパイプの直径はランダムに変化するが、対数正規分布を仮定し、その結果としてパイプ半径の指数についても同様に対数正規分布を仮定する。その値を平均値とその変動分を用いて式において表現すると

$$Q = \bar{Q} + Q' \quad (4-4)$$

$$r^4 = r_g^4 \exp(\beta) \Rightarrow 4 \ln(r) = 4 \ln(r_g) + \beta \quad (4-5)$$

$$\varphi = H + h \quad (4-6)$$

ここに、

\bar{Q} : 流速の平均 (m/sec)

Q : 流速の変動 (m/sec)

r_g : パイプ半径の幾何平均 (m)

β : 直径の4乗の平均からの変動 (m⁴)

H : 水頭の平均 (m)

h : その変動 (m)

第4-4式における右边第2項は、第2式の流量一定条件より $Q' = 0$ となり、 β の条件として、 $E(\beta) = 0$ および $E(\beta^2) = \sigma_\beta^2$ が成り立つ。また、第4-6式においても同様に $E(\varphi) = H, E(h) = 0$ が成り立つ。第4-5式の設定において、透水係数の対数の変動と定義している β の特性としては、透水係数本来より変動の大きさが小さい。

上述の数学表現を第4-1式に導入し、以下の変形を行う。

$$\begin{aligned} Q = \bar{Q} + Q' &= \pi r_g^2 \frac{\gamma}{8\mu} (\exp^{\beta/4})^4 \left(-\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial h}{\partial x} \right) = C_l e^\beta \left(J - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ &= C_l \left(1 + \beta + \frac{1}{2}\beta^2 + \frac{1}{3!}\beta^3 + \Lambda \right) \left(J - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (4-7)$$

ここで、第4-7式において $C_l = \pi r_g^4 \gamma / 8$ とし、 $J = -\partial H / \partial x$ とし、 β および $\frac{\partial h}{\partial x}$ は、微少であると仮定し、3乗項以降を無視して $JE(\beta) = 0$ の条件を導入することにより平均流れの式は、

$$\bar{Q} = C_l [J(1 + \frac{1}{2}\sigma_\beta^2) - E(\beta \frac{\partial h}{\partial x})] \quad (4-8)$$

となる。また、第 4-8 式の最終項は、以下のように展開する。

$$Q' = Q - \bar{Q} = C_l (J\beta - \frac{\partial h}{\partial x}) = 0 \Rightarrow J\beta = \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4-9)$$

第 4-9 式を代入することにより第 4-8 式の最終項は、以下の表現となる。

$$E(\beta \frac{\partial h}{\partial x}) = E(\beta J\beta) = JE(\beta^2) = J\sigma_\beta^2 \quad (4-10)$$

よって、地下水流れの平均式は以下になる。

$$\bar{Q} = C_l J(1 - \sigma_\beta^2 / 2) \quad (4-11)$$

第 4-7 式において無視した 3 乗項以降を考慮した場合、第 4-11 式は、正確には以下の指数関数で表現される。

$$\bar{Q} = C_l J \exp[-\sigma_\beta^2 / 2] \quad (4-12)$$

同様な式展開は、一般的に、例えば Gelhar らも同様の展開を行っており、理論的にこれらについては示されている。

第 4-12 式を動水勾配 J で割り込むと、透水係数に当たる流れの抵抗は、以下の式により表現される。

$$C_f = C_l \exp[-\sigma_\beta^2 / 2] \quad (4-13)$$

ここで、地下水流れを評価するための有効半径は以下になる。

$$r_f = r_g \exp\left[-\sigma_\beta^2 / 8\right] \quad (4-14)$$

ここに、 r_f ：地下水流れ（flow）を支配する半径とする。

4.4 物質移行評価

本節では、まず非吸着性のトレーサーの移行挙動を評価するためにマトリックス拡散を無視した場合の物質移行の評価を行い、続いてマトリックス拡散を線形で導入した評価を行う。

4.4.1 非吸着性トレーサーの移行挙動評価

(1) パイプモデルの評価

ここでは、物質移行を確率論的にパイプモデルを用いて評価する。評価の仮定として、前節同様、割れ目を模擬したパイプの直径はランダムに変化するが、対数正規分布を仮定し、その結果としてパイプ半径の指数についても同様に対数正規分布を仮定する。

第3式における濃度とパイプの面積 A を平均とその変動により表現すると、
 $c = \bar{c} + c'$, $E(c) = \bar{c}$, $E(c') = 0$, $A = \bar{A} + A'$, $\bar{A} = \pi \bar{r}^2$
 となり、第4-3式の平均値による式は、

$$\bar{A} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + E\left[A' \frac{\partial c'}{\partial t}\right] + \bar{Q} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + E\left[Q' \frac{\partial c'}{\partial x}\right] - D \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} = 0 \quad (4-15)$$

また、変動側の式展開は、

$$A' \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{A} \frac{\partial c'}{\partial t} + \bar{Q} \frac{\partial c'}{\partial x} + Q' \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c'}{\partial x^2} = 0 \quad (4-16)$$

1次元流れの定義により流量 Q は常に一定であることから Q' はゼロとなる。実流速ベクトルの座標系を用いることにより書き直すと

$$\bar{A} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} \Big|_\xi - V \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} \right) + E \left[A' \left(\frac{\partial c'}{\partial t} \Big|_\xi \right) - V \frac{\partial (A' c')}{\partial \xi} \right] + \bar{Q} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} - D \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \xi^2} = 0 \quad (4-17)$$

となり、書き換えると

$$\bar{A} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} \Big|_{\xi} + E \left[A' \left(\frac{\partial c'}{\partial t} \Big|_{\xi} \right) - V \frac{\partial (A' c')}{\partial \xi} \right] + (\bar{Q} - \bar{A}V) \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} - D \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \xi^2} = 0 \quad (4-18)$$

上記の $E \left[A' \left(\frac{\partial c'}{\partial t} \Big|_{\xi} \right) - V \frac{\partial (A' c')}{\partial \xi} \right]$ 項を評価するために変動部分の式は、

$$A' \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} \Big|_{\xi} - V \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} \right) + \left[\bar{A} \left(\frac{\partial c'}{\partial t} \Big|_{\xi} \right) - V \frac{\partial (\bar{A} c')}{\partial \xi} \right] + \bar{Q} \frac{\partial c'}{\partial \xi} - D \frac{\partial^2 c'}{\partial \xi^2} = 0 \quad (4-19)$$

ここで、物質は半径の相関距離より広域に広がり、よって局所的に見ると濃度勾配は一定とみなすことができる。

さらに、濃度およびパイプの面積の変動式は、spectral decomposition theory により表現すると、

$$c' = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik(\xi + Vt)} dZ_c \quad (4-20)$$

$$A' = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikx} dZ_A \quad (4-21)$$

第 4-19 式は、以下の表現となる。

$$\bar{A} \frac{dZ_c}{dt} \Big|_{\xi} + (ikQ - ikV\bar{A} + Dk^2) dZ_c = -dZ_A \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} \Big|_{\xi} - V \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} \right) \quad (4-22)$$

上式の左辺第 1 項及び右辺第 1 項は、局所的に時間変化はごく小さいと仮定すると、

$$(ikQ - ikV\bar{A} + Dk^2) dZ_c = V \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} dZ_A \quad (4-23)$$

よって、 $E\left[V\frac{\partial(A'c')}{\partial\xi}\right]$ は、第 4-20 式、第 4-21 式、第 4-23 式により以下のように表現される。

$$E\left(\frac{\partial \mathcal{V}A'c'}{\partial\xi}\right) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} V dZ_A \frac{\partial \bar{c}}{\partial\xi} dZ_A^* / \Omega}{\partial\xi} = B \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial\xi^2} \quad (4-24)$$

ここに、 $\Omega = ikQ - ikV\bar{A} + Dk^2$ とし、B 項は、パイプにおける広域分散係数として

$$B = \int_{-\infty}^{\infty} V dZ_A dZ_A^* / \Omega \text{ と表現できる。}$$

最終的には、平均移流分散式は、以下の式で表現することができる。

$$\bar{A} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} \Big|_z + (\bar{Q} - \bar{A}V) \frac{\partial \bar{c}}{\partial\xi} - (D + B) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial\xi^2} = 0 \quad (4-25)$$

上式において、重要な意味は物質移行の中心における移動座標系では定義上第 2 項の分散係数はゼロになる、すなわち動座標系において、平均濃度はゼロとなるため、以下の関係が成り立つことである。

$$V = \bar{Q} / \bar{A} \quad (4-26)$$

ここで、物質の移動に係わる特性値としての \bar{A} であり、算術平均と定義している。これをパイプの幾何平均と半径で表現すると

$$A_T = \bar{A} = A_g \exp[\sigma_y^2 / 2] \quad (4-27)$$

ここに、 A_g はパイプ面積の幾何平均であり、 σ_y^2 は、分散である。

地下水流動を支配するのがパイプの半径の 4 乗であり、物質移行については、2 乗（パイプ面積）であることが得られた。ここで、両者を比較するためにパイプ半径で以下のように表現を試みる。

前述のように、透水性を支配するパイプ半径の 4 乗については、

$$r^4 = r_g^4 \exp(\beta) \Rightarrow 4 \ln(r) = 4 \ln(r_g) + \beta \quad (4-28)$$

となり、物質移行を支配するパイプ半径 2 乗については、

$$r^2 = r_g^2 \exp(\gamma) \Rightarrow 2 \ln(r) = 2 \ln(r_g) + \gamma \quad (4-29)$$

ここに、 β および γ は、0 を平均値とする対数正規分布である。そこで、以下の変換を行うと

$$(r^2)^2 = [r_g^2 \exp(\gamma)]^2 \Rightarrow \ln(r)^4 = \ln r_g^4 \exp \gamma^2 \Rightarrow 4 \ln(r) = 4 \ln(r_g) + 2\gamma \quad (4-30)$$

β と γ の関係は、数学的に以下の表現となる。

$$\beta = 2\gamma \quad (4-31)$$

以上より分散についても同様の表現が取れ、 β および γ の分散は以下のように表現される。

$$\sigma_\beta^2 = 4\sigma_\gamma^2 \quad (4-32)$$

以上の表現を用いて、地下水流れと物質の移行の特性は、両者ともパイプにおける直径の変動で評価され、以下の式となる。

$$\text{地下水流れを支配する半径 } r_f = r_g \exp[-\sigma_\beta^2 / 8] \quad (4-33)$$

$$\text{物質移行を支配する半径 } r_i = r_g \exp[\sigma_\beta^2 / 16] \quad (4-34)$$

$$(\pi_i^2 = \pi_g^2 \exp[\sigma_\gamma^2 / 2] = \pi_g^2 \exp[\sigma_\beta^2 / 8])$$

よって、 r_i : 物質移行を代表する半径と r_f : 地下水流れを代表する半径の関係は、

$$r_i / r_f = \exp[3\sigma_\beta^2 / 16] \quad (4-35)$$

となる。

(2) 平行平板モデル (Gelhar, 1987)

パイプモデルと同様の計算を平行平板モデルに適用した式を以下に示す。
地下水流動に関わる透水量係数は、3 乗則より以下のように表現できる。

$$T_F = \frac{\gamma}{12\mu} b_g^3 \quad (4-36)$$

ここに、透水量係数を表現する平行平板の開口幅は、幾何平均で表現できる。

$$b_F = b_g \quad (4-37)$$

また、物質移行に表現する平行平板の開口幅は、算術平均で表現できる。また、幾何平均と分散より表現することも以下のようにできる。

$$b_T = b_a = b_g \exp[\sigma_a^2 / 2] \quad (4-38)$$

さらに、2 式及び3 式より以下の透水性を支配する開口幅と物質移行を支配する開口幅の関係は以下のように表現される。

$$b_T / b_F = b_g \exp(\sigma_a^2 / 2) / b_g = \exp(\sigma_a^2 / 2) \quad (4-39)$$

4.5 原位置計測データの評価

第4節までに割れ目の概念として、パイプモデルの半径あるいは平行平板モデルの開口幅で地下水流動および物質移行の特性を評価した。本節では、原位置での計測データあるいは室内試験で得られるデータより特性評価を行う。

4.5.1 パイプモデルにおけるパイプ半径と透水量係数との関係

前節では、物質移行と地下水流れの関係をパイプの半径の関数で評価したが、本節ではさらにサイト評価初期の段階で計測される透水量係数の平均及び変動で評価を行う。

仮に地下水流れの抵抗（透水係数）をCとおき、個別の透水係数計測値を C_i ($i=1\sim n$)、全て (n 個) の透水計測値の幾何平均を C_g とする。

$$C_i = \frac{\gamma}{8\mu} \pi r_i^4 \exp\left[-\sigma_{\beta}^2 / 2\right] \quad (4-40)$$

$$C_g = \frac{\gamma}{8\mu} \pi r_g^4 \exp\left[-\sigma_{\beta}^2 / 2\right] \quad (4-41)$$

$$\sigma_{\ln C}^2 = \frac{\sum (\ln C_i - \ln C_g)^2}{n} \quad (4-42)$$

1 個の計測値の C_i には、複数（1 以上）の割れ目が存在し合計 m 個のパイプを構成すると仮定する。

エルゴード性より、個別の割れ目の中での分散は、全体の透水係数の分散と等しいと仮定すると、 $\sigma_{\beta}^2 = \sigma_{\beta}^2$ となる。

よって、

$$\sigma_{\ln C}^2 = \frac{\sum (4 \ln r_i - \sigma_{\beta}^2 / 2 - 4 \ln r_g + \sigma_{\beta}^2 / 2)^2}{n} = \frac{\sum (\beta)^2}{n} = \frac{\sum \beta^2}{n} = \sigma_{\beta}^2 \quad (4-43)$$

となる。ここで、 $\sigma_{\beta}^2 = 4\sigma_{\gamma}^2$ 、 $\beta = \ln r^4$; $\gamma = \ln r^2$

地下水流れの抵抗値は、すなわち透水係数であることから、以下のように表せる。

$$\sigma_{\beta}^2 = 4\sigma_{\gamma}^2 = \sigma_{\ln T}^2$$

よって、以下の関係が明らかになる。

$$r_T / r_F = \exp(3\sigma_{\ln T}^2 / 16) \quad (4-44)$$

すなわち、間隙率（パイプモデルの断面積）で評価すると

$$n_T / n_F = \exp(3\sigma_{\ln T}^2 / 8) \quad (4-45)$$

となる。ここに、原位置計測された透水係数の分散： $\sigma_{\ln T}^2$

4.5.2 平行平板モデルにおける開口幅と透水量係数との関係

平行平板モデルにおける透水係数と割れ目の開口幅の分散との関係

本節においては、Gelhar が、計測値を直接用いている割れ目開口幅について原位置試験において、計測される透水量係数から、割れ目開口幅の分散との関係を検討する。まず、割れ目の3乗則より、計測された透水量係数は、以下のように表現される。なお、計測値は、1個の割れ目に対して1個の透水量係数を計測しているとする。

$$T_{ij} = \frac{\gamma}{12\mu} b_{ij}^3 \quad (4-46)$$

さらに、平均透水量係数を開口幅の平均で表現すると以下ようになる。

$$T_g = \frac{\gamma}{12\mu} b_g^3 \quad (4-47)$$

上式より透水量係数の対数分散を求めると、

$$\sigma_{\ln T}^2 = \frac{\sum (\ln(T_{ij}) - \ln(T_g))^2}{n \times m} = \frac{\sum (3 \ln b_{ij} - 3 \ln b_g)^2}{n \times m} = \frac{9 \sum (\ln b_{ij} - \ln b_g)^2}{n \times m} = 9\sigma_{\ln b}^2 \quad (4-48)$$

よって、

$$\sigma_{\ln b}^2 = \frac{\sigma_{\ln T}^2}{9} \quad (4-49)$$

上式を 式に代入することにより以下の関係を得る。

$$b_T / b_F = \exp(\sigma_{\ln T}^2 / 18) \quad (4-50)$$

ここに、

T_F ：地下水流動の観点から見た透水量係数 (m^2 / s)

γ ：重力項 (m/s^2)；

μ ：粘性項 (m^2/s)；

b_F ：地下水流動を支配する割れ目開口幅 (m)

b_T ：物質移行を支配する割れ目開口幅 (m)

b_g ：割れ目開口幅の幾何平均 (m)

b_a ：割れ目開口幅の算術平均 (m)

σ_a^2 ：割れ目開口幅の対数値の分散とし、 $\ln b = \ln b_g + \alpha, ((\ln(m))^2)$

$\sigma_{\ln T}^2$ ：原位置で測定された透水量係数の対数値の分散 ($(\ln(m^2 / sec))^2$)

4.6 感度解析

評価したパラメータの敏感性を知るために感度解析を以下に行う。

4.6.1 感度解析に用いるパラメータの設定

(1) パイプモデルのパラメータ設定

パイプモデルにおけるパラメータとしては、割れ目の特性値として、パイプの平均径を固定して、分散値の変化による間隙率への影響およびパイプモデル半径の比（物質移行半径／透水半径）を示す場合と割れ目の数をパラメータとして扱う場合を示す。

- パイプ半径の4乗の対数値の分散 σ_β^2 (m^8) : 0.1 to 5:
- パイプの数 : 1 ~ 100

(2) 平行平板のパラメータ設定

平行平板モデルにおけるパラメータとしては、割れ目の特性値として平行平板開口幅を固定して、分散値の変化による間隙率への影響および開口幅の比（物質移行を支配する幅／透水性を支配する幅）を示す場合と割れ目の数をパラメータとして扱う場合を示す。

- 平行平板の開口幅の対数値の分散 σ_α^2 $\ln b = \ln b_g + \alpha, ((\ln(m))^2)$: 0.1~5.0 :
- 平行平板の割れ目の数 : 1 ~ 100

4.6.2 感度解析結果

Table 4.1~Table 4.3 にパイプモデルにおける σ_β^2 の感度解析結果を示す。Table 4.4 ~Table 4.6 に平行平板モデルにおける σ_α^2 の感度解析結果を示す。

Figure 4.4 にパイプモデルにおけるパイプ半径の4乗の対数値の分散 $\ln(r^4)$ の感度解析を図示する。分散が小さい領域においては、透水性と物質移行の違いは顕著ではないが、分散が大きくなるにつれ、4乗の影響から大きな違いが得られる。同様に Figure 4.5 では、パイプ半径の対数値の分散における感度解析結果を示す。

割れ目の開口幅の小さな変化が透水性から決まる間隙率と物質移行から決まる間隙率の比に1桁以上の違いとなって表れている。平行平板モデルが間隙率や開口幅に比例するのに比してパイプモデルが半径の2乗の関数になることからパイプモデルが分散に対して敏感な結果となった。また、Figure 4.7 には、透水量係数の分散による物質移行特性と透水

特性の違いを間隙率の比および有効半径の比で示している。これによれば、透水量係数のばらつきが透水性から求める地下水流速と物質が移行する速度に大きな影響を与えることがわかる。

Table 4.1 パイプ1個に対する分散の影響評価

透水性を評価する特性		透水量係数	σ_{β}^2	物質移行特性		物質移行特性／透水特性	
半径 (m)	間隙率	(m^2/s)	($\text{Ln}(\text{m})$) ²	半径 (m)	間隙率	半径	間隙率
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	0.10	5.09E-04	8.15E-07	1.0	1.0
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	1.00	6.03E-04	1.14E-06	1.2	1.5
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	2.00	7.27E-04	1.66E-06	1.5	2.1
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	4.00	1.06E-03	3.52E-06	2.1	4.5
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	6.00	1.54E-03	7.45E-06	3.1	9.5
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	8.00	2.24E-03	1.58E-05	4.5	20.1
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	10.00	3.26E-03	3.34E-05	6.5	42.5
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	12.00	4.74E-03	7.07E-05	9.5	90.0
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	14.00	6.90E-03	1.50E-04	13.8	190.6
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	16.00	1.00E-02	3.17E-04	20.1	403.4
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	18.00	1.46E-02	6.71E-04	29.2	854.1
5.0E-04	7.85E-07	2.41E-07	20.00	2.13E-02	1.42E-03	42.5	1808.0

Table 4.2 パイプ10個に対する分散の影響評価

透水性を評価する特性		透水量係数	σ_{β}^2	物質移行特性		物質移行特性／透水特性	
半径 (m)	間隙率	(m^2/s)	($\text{Ln}(\text{m})$) ²	半径 (m)	間隙率	半径	間隙率
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	0.10	5.09E-04	8.15E-06	1.0	1.0
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	1.00	6.03E-04	1.14E-05	1.2	1.5
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	2.00	7.27E-04	1.66E-05	1.5	2.1
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	4.00	1.06E-03	3.52E-05	2.1	4.5
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	6.00	1.54E-03	7.45E-05	3.1	9.5
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	8.00	2.24E-03	1.58E-04	4.5	20.1
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	10.00	3.26E-03	3.34E-04	6.5	42.5
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	12.00	4.74E-03	7.07E-04	9.5	90.0
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	14.00	6.90E-03	1.50E-03	13.8	190.6
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	16.00	1.00E-02	3.17E-03	20.1	403.4
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	18.00	1.46E-02	6.71E-03	29.2	854.1
5.0E-04	7.85E-06	2.41E-06	20.00	2.13E-02	1.42E-02	42.5	1808.0

Table 4.3 パイプ100個に対する分散の影響評価

透水性を評価する特性		透水量係数	σ_a^2	物質移行特性		物質移行特性／透水特性	
半径 (m)	間隙率	(m ² /s)	(Ln(m)) ²	半径 (m)	間隙率	半径	間隙率
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	0.10	5.09E-04	8.15E-05	1.0	1.0
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	1.00	6.03E-04	1.14E-04	1.2	1.5
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	2.00	7.27E-04	1.66E-04	1.5	2.1
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	4.00	1.06E-03	3.52E-04	2.1	4.5
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	6.00	1.54E-03	7.45E-04	3.1	9.5
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	8.00	2.24E-03	1.58E-03	4.5	20.1
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	10.00	3.26E-03	3.34E-03	6.5	42.5
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	12.00	4.74E-03	7.07E-03	9.5	90.0
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	14.00	6.90E-03	1.50E-02	13.8	190.6
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	16.00	1.00E-02	3.17E-02	20.1	403.4
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	18.00	1.46E-02	6.71E-02	29.2	854.1
5.0E-04	7.85E-05	2.41E-05	20.00	2.13E-02	1.42E-01	42.5	1808.0

Table 4.4 平行平板1条に対する分散の影響評価

透水性を評価する特性		透水量係数	σ_a^2	物質移行特性		物質移行特性／透水特性	
開口幅 (m)	間隙率	(m ² /s)	(Ln(m)) ²	開口幅 (m)	間隙率	開口幅 (m)	間隙率
1.0E-04	1.0E-04	8.17E-07	0.1	1.05E-04	1.05E-04	1.1	1.1
			1.0	1.65E-04	1.65E-04	1.6	1.6
			2.0	2.72E-04	2.72E-04	2.7	2.7
			4.0	7.39E-04	7.39E-04	7.4	7.4
			6.0	2.01E-03	2.01E-03	20.1	20.1
			8.0	5.46E-03	5.46E-03	54.6	54.6
			10.0	1.48E-02	1.48E-02	148.4	148.4
			12.0	4.03E-02	4.03E-02	403.4	403.4
			14.0	1.10E-01	1.10E-01	1096.6	1096.6
			16.0	2.98E-01	2.98E-01	2981.0	2981.0
			18.0	8.10E-01	8.10E-01	8103.1	8103.1
			20.0	2.20E+00	2.20E+00	22026.5	22026.5

Table 4.5 平行平板10条に対する分散の影響評価

透水性を評価する特性		透水量係数	σ_a^2	物質移行特性		物質移行特性／透水特性	
開口幅 (m)	間隙率	(m ² /s)	(Ln(m)) ²	開口幅 (m)	間隙率	開口幅 (m)	間隙率
1.0E-04	1.0E-03	8.17E-06	0.1	1.05E-04	1.05E-03	1.1	1.1
			1.0	1.65E-04	1.65E-03	1.6	1.6
			2.0	2.72E-04	2.72E-03	2.7	2.7
			4.0	7.39E-04	7.39E-03	7.4	7.4
			6.0	2.01E-03	2.01E-02	20.1	20.1
			8.0	5.46E-03	5.46E-02	54.6	54.6
			10.0	1.48E-02	1.48E-01	148.4	148.4
			12.0	4.03E-02	4.03E-01	403.4	403.4
			14.0	1.10E-01	1.10E+00	1096.6	1096.6
			16.0	2.98E-01	2.98E+00	2981.0	2981.0
			18.0	8.10E-01	8.10E+00	8103.1	8103.1
			20.0	2.20E+00	2.20E+01	22026.5	22026.5

Table 4.6 平行平板100条に対する分散の影響評価

透水性を評価する特性		透水量係数	σ_a^2	物質移行特性		物質移行特性／透水特性	
開口幅 (m)	間隙率	(m ² /s)	(Ln(m)) ²	開口幅 (m)	間隙率	開口幅 (m)	間隙率
1.0E-04	1.0E-02	8.17E-05	0.1	1.05E-04	1.05E-02	1.1	1.1
			1.0	1.65E-04	1.65E-02	1.6	1.6
			2.0	2.72E-04	2.72E-02	2.7	2.7
			4.0	7.39E-04	7.39E-02	7.4	7.4
			6.0	2.01E-03	2.01E-01	20.1	20.1
			8.0	5.46E-03	5.46E-01	54.6	54.6
			10.0	1.48E-02	1.48E+00	148.4	148.4
			12.0	4.03E-02	4.03E+00	403.4	403.4
			14.0	1.10E-01	1.10E+01	1096.6	1096.6
			16.0	2.98E-01	2.98E+01	2981.0	2981.0
			18.0	8.10E-01	8.10E+01	8103.1	8103.1
			20.0	2.20E+00	2.20E+02	22026.5	22026.5

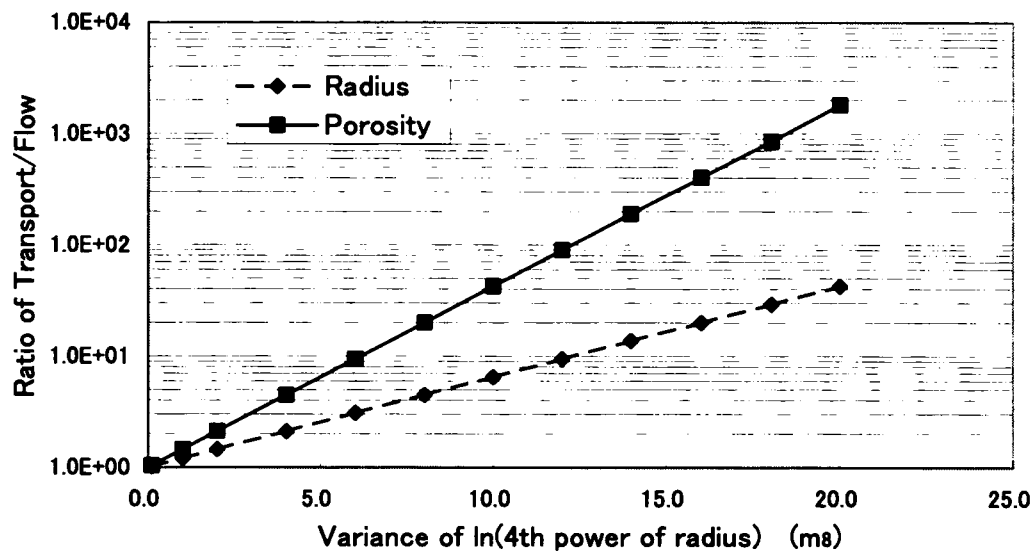


Figure 4.4 割れ目の直径の4乗の分散（平均は等しい）をパラメータとした物質移行と流動の相関への影響

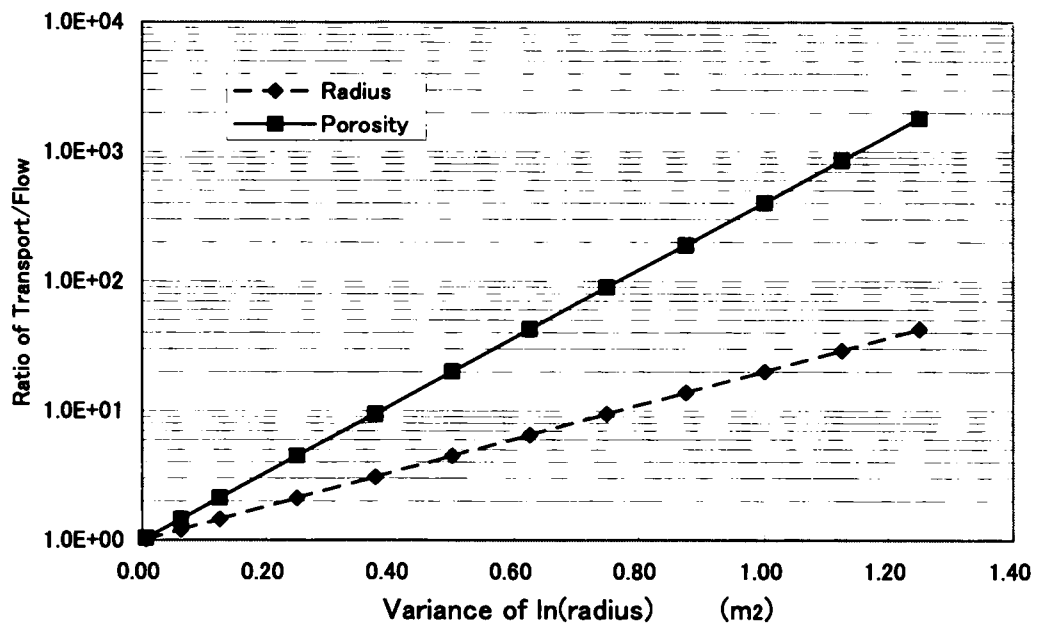


Figure 4.5 割れ目の直径の分散（平均は等しい）をパラメータとした物質移行と流動の相関への影響

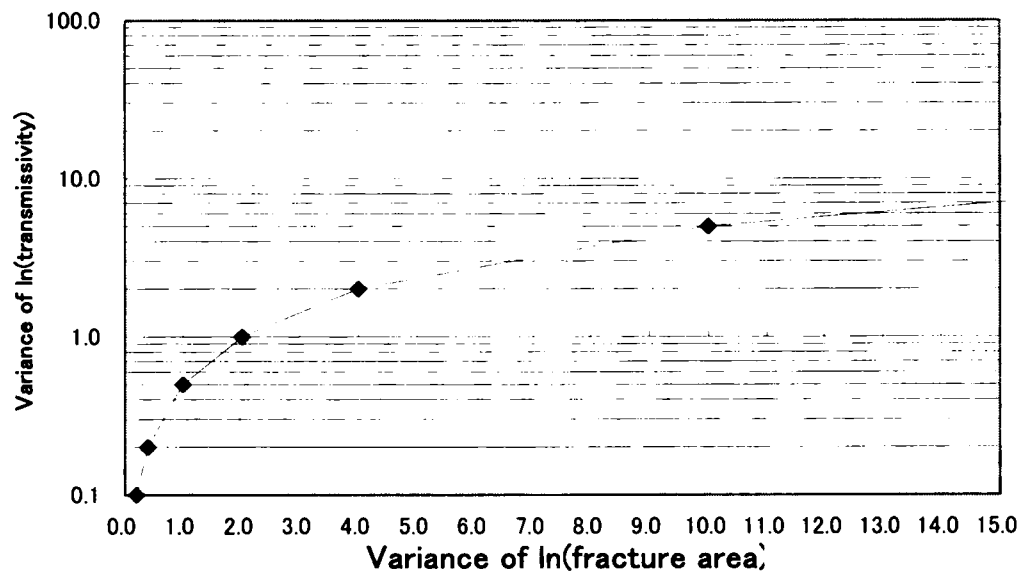


Figure 4.6 透水係数の対数における分散とパイプモデルの断面積の比

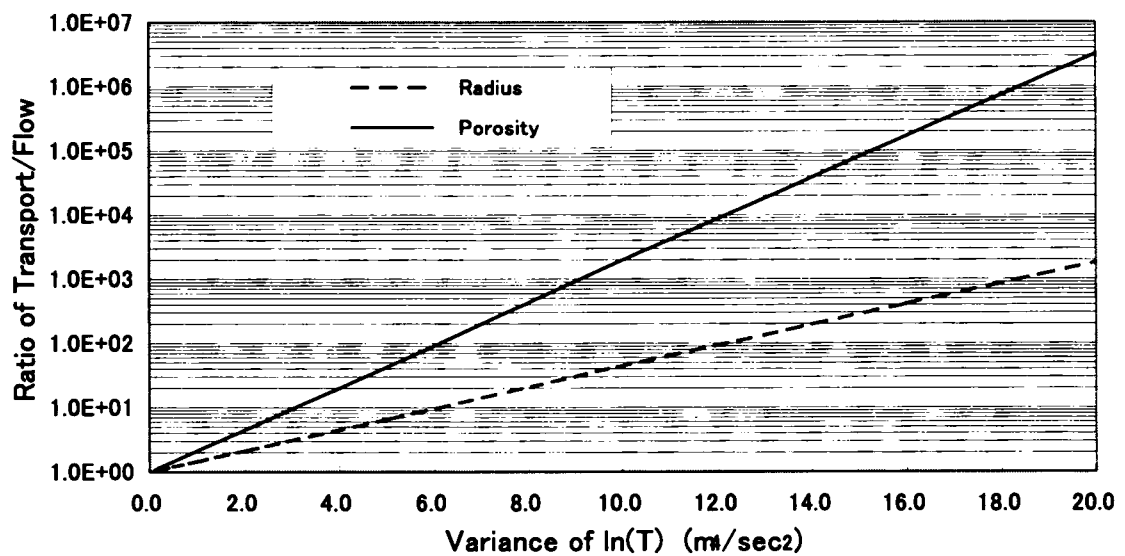


Figure 4.7 透水量係数の対数値の分散と透水性から決まる有効間隙率と物質移行から決まる有効間隙率の比

4.7 原位置データを用いた整合性評価

Fanay-Augères における透水係数とトレーサー試験の結果（3章を参照）を第29式に適用することで、原位置データとの整合性を評価する。同様のパイプモデルを用いて Fanay-Augères のデータを評価した Cacas ら(1990)は、“トレーサーを評価する遅延係数”とし、“ Cr (遅延係数) = 32 は、同じ透水性を持つパイプにおいて、現実には平均的に32倍の地下水の量を有することを意味する”と説明し、トレーサーの実測値を解析値で割り、求めている。

本研究においては、原位置試験の透水係数の分散値 $\sigma_{\ln T}^2 = 9.45$ を第29式に代入することで理論的に、透水性と物質移行の間隙率比を求めた結果、物質移行の間隙率と地下水流れの間隙率の比は34.5となった。

まず、第1点は、Cacas らの結果と良好な一致を示した。さらに、第2点として、Cacas らが割れ目ネットワークモデルによる複雑な解析において、トレーサー試験のピーク到達時間からのフィッティングしか、この比が得られなかったことに対して、本研究では、理論的に得ることができた。

さらなる、整合性評価の可能性として、パイプモデルの評価式における地下水流れを支配する半径 $r_f = r_g \exp[-\sigma_\beta^2/8]$ 、地下水流動を評価する透水係数

$C_g = \frac{\gamma}{8\mu} \pi r_g^4 \exp[-\sigma_\beta^2/2]$ が得られている場合、原位置試験（あるいは室内試験）透水試験結果と細孔径分布および間隙率よりその整合性確認が行えことが可能と考える。

4.8 まとめ

本研究では、亀裂性岩盤の地下水流動および物質移行問題を解く有効な概念モデルとして、パイプモデルを評価し、得られた成果としては、確率論的アプローチによりパイプモデルにおいて、透水性を得るための抵抗から得られる有効間隙率と物質移行から得られる有効間隙率の関係として、 $n_T/n_F = \exp(3\sigma_{\ln T}^2/8)$ を得た。ここに、 n_F は、透水性から得られる有効間隙率であり、 n_T は、物質移行の有効間隙率を示し、 $\sigma_{\ln T}^2$ は、原位置試験で得られる透水量係数の対数値の分散を示す。これは、透水性がパイプモデルの断面積の幾何平均に支配されると同時に物質移行を支配する流量が算術平均に支配されることを理論的に示したものである。

本研究は、①物質移行における有効な間隙率の設定、②透水試験で得られたデータよりトレーサー試験無しに物質移行の間隙率を推定、③トレーサー試験立案の支援としての遅延係数（あるいは文献によっては屈曲率）を推定、④透水試験とトレーサー試験の結果の妥当性評価と言ったことに対して現実的な答えを準備できるものと考ええる。

この単純化した理論解によれば、物質の移行を考えた場合の有効間隙率は、割れ目の幅の変動、不均質性、表面の粗度等により増加することが確認された。

また、計測された透水係数データを、定量的な有効間隙率評価に用いることに成功した。もちろん、本解析は現実の単純化の仮定で発生する係数を評価したものであり、実現象を直接評価したものでは無いが、低透水性の亀裂性岩盤における初期調査段階でトレーサー試験の実施やモデルコンセプトの構築には極めて有効であると考ええる。

参考文献

- Cacas, M.C., E. Ledoux, G. de Marsily, A. Barbreau, P. Calmels, B. Gaillard, and R. Margritta, Modelling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation, 1, The flow model, Water Resour. Res., 26(3), 479-489, 1990a.
- Cacas, M.C., E. Ledoux, G. de Marsily, A. Barbreau, P. Calmels, B. Gaillard, and R. Margritta, Modelling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: Calibration and validation, 2, The transport model, Water Resour. Res., 26(3), 491-500, 1990b.
- Gelhar L. W., Applications of stochastic models to solute transport in fractures rocks, SKB technical report 87-05, 1987

第5章 人工構造物及びその周辺岩盤の物質移行（ガス）に関する実験的評価

5.1 概要

廃棄物の封じ込めにおいて、人工構造物が岩盤と同様の封じ込め機能あるいはバリア機能を果たす。具体的には、地下水の流動と物質の移行を遅延させる機能を有する。このバリア機能を担保する上で考慮すべき要因として、石油などの揮発性汚染物質のガス化、有機物によるガス発生あるいは還元雰囲気下での金属腐食によるガス発生があげられる。こうしたガスは、人工構造物へ悪影響を与える可能性、ガス自体が有害である可能性、ガスによる汚染物質の押し出しの可能性等が想定され、廃棄物を封じ込める上で考慮を要する。

特に、地下における放射性廃棄物の処分環境においては、廃棄物や廃棄物の容器及び構造物中の鉄筋等に使用される金属の腐食、廃棄物中の有機物の化学・微生物分解などにより水素・窒素等の気体（以下ガスと総称）が発生することが、これまでの研究により明らかとなりつつある。これらのガスの発生、移行に関する問題は、ここ 10 年来、研究の対象として、EC や OECD/NEA の共同研究に取り上げられている（例：EVEGAS3）、MEGAS2 等）。最近では、EU と NEA の共同研究として、処分場で発生するガスに関し、シナリオと評価方法についての現状がまとめられた³⁾。こうした研究において、処分場で発生するガスの安全性への潜在的な影響として、以下のようなものが示されている。

- ・過剰圧力とそれに関連する事象—ガスの発生が、ガスの移行速度より大きい場合は、処分場内にガスが蓄積し、圧力が上昇する。もし、圧力の上昇により、人工バリアや天然バリアが損傷すれば、放射性核種の移行を早める経路を形成する恐れがある。また、蓄積されたガスで高圧の処分場に、ボーリング孔が貫通すれば、処分場内の地下水の突然の吹き出し (blow out) も起こりうる。

- ・放射性及び可燃性ガスの地表への放出— ^3H , ^{14}C などを含むガス、 H_2 , CH_4 などの可燃ガスが地表に達する恐れがある。

- ・汚染した地下水の移動への影響—蓄積したガスによる水の押し出し、ガス気泡中に地下水が取り込まれ状態での移動及びガス経路の形成と消滅が連続することによる地下水の流動の可能性がある。

- ・コロイドの影響—ガスと水の界面へ吸着したコロイドによる核種の移動の可能性がある。

これらの現象を評価するために、信頼性のあるガスの発生量及び移行挙動の評価手法を構築することは重要な課題であると考え、ガスの移行挙動における多重バリアシステムの評価手法の信頼性を向上させることを目的として、処分場環境と類似した原位置条件下で模擬人工バリアと周辺の岩盤（天然バリア）を含む系でのガス移行挙動試験 (Gas Migration

Test：以下 GMT）を行っている。

本試験は、試験計画立案から周辺岩盤の調査、人工バリアの試験時モニタリング、さらには移行経路のモデル化の大きな枠組みを第2章における知見から構築し、ガストレーサーおよび水トレーサーを評価する観点では第3章でのトレーサー評価の知見を生かし、細孔径中のガス移行に関しては第4章でのパイプモデルでの知見を反映する。

なお、本研究の一部は、経済産業省からの受託業務として、Nagra（スイス放射性廃棄物管理協同組合）との間で締結されたグリムゼルフーズV包括協定に基づきグリムゼルフーズVの試験の一環として平成9年に開始され、原子力環境整備促進・資金管理センターが主体となり、Nagra（スイス）、ENRESA（スペイン）、ANDRA（フランス）、BGR、GRS、DBE（ドイツ）等海外の機関が参加して進めている（Table 5.1）。グリムゼル試験場は、スイス南部のグリムゼル峠にある揚水式水力発電所のアクセス・トンネルに隣接して作られた花崗岩を母岩とする地下研究施設である（Figure 5.1）。

Table 5.1 本試験に協力している機関と協力分野

パートナー名	国名	協力分野
Nagra	スイス	グリムゼル試験場のフェーズVの主催者
ENRESA	スペイン	室内試験、CODE_BRIGHTによる解析
BGR	ドイツ	RockFlowによる解析
ANDRA	フランス	MEHRLINによる解析
GRS	ドイツ	ガスの採取・分析等
DBE	ドイツ	光ファイバーによる計測

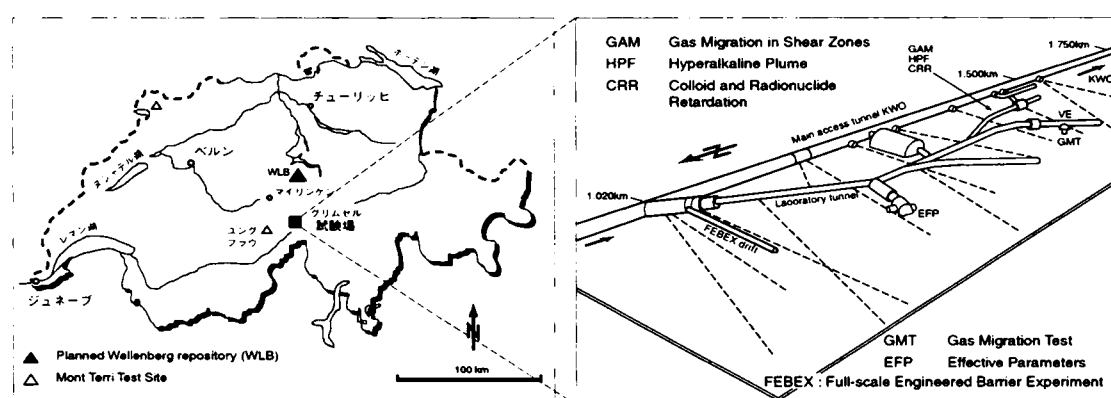


Figure 5.1 グリムゼル地下試験場

5.1.1 研究目的

ガス移行挙動の評価を行うに当たり、4項目の目的を設定し、その目的を達成するために具体的に、実施の必要と考えられる項目を明確にした上で、検討を進めることとした (Table 5.2)。

Table 5.2 目的および必要事項

目的	目的達成のために実施が必要な事項
処分施設内で発生するガスの移行という観点からの、人工バリアと周辺岩盤の機能の評価	人工バリアおよび周辺岩盤の飽和 人工バリアおよび周辺岩盤の構成要素のガス移行特性の把握 ガス移行による人工バリアおよび周辺岩盤の透水性変化の有無
原位置条件下での人工バリアと周辺岩盤を通過するガス移行に適用できるモデルの評価／検討	ガス移行概念の構築 移行概念を模擬しうる解析手法の選定 試験後の移行経路、透水特性等のデータ取得による概念、解析手法の見直し ガス移行径路の把握*
ガス移行の観点から、ガスベントの有無を含めた人工バリアシステムの設計へのデータの取得	設計値の設定 品質管理プログラムの設定 施工後のサンプリングデータによる設計値の見直し 人工バリア機能から見た仕様の施工可能性確認 ガスベントの設計仕様・施工方法の確認 品質管理プログラムの設定と施工後の確認
原位置状況下での放射性廃棄物サイロ型処分システム建設と人工バリアシステム構築の実演	想定される施工方法・施工手順にて施工 施工過程のビデオ撮影

* 移行経路の同定は、ガス移行の量、速度、人工バリアへの影響等を考え、必要に応じて検討する。

5.1.2 試験構成

GMT プロジェクトは、原位置試験、室内試験及び解析の3つから構成されている。本試験の主な実施内容と工程を Table 5.3 に示す。

Table 5.3 GMT プロジェクトの主な実施内容と今後の予定

年度	1997 (H9)	1998 (H10)	1999 (H11)	2000 (H12)	2001 (H13)	2002 (H14)	2003 (H15)	2004 (H16)
1. 試験計画の策定	■	■	■					
2. 人工バリア・ガスバント等の評価試験（室内）		■	■	■	■	■	■	■
3. 試験位置の選定及び地質調査	■							
4. 試験空洞掘削と周辺岩盤調査		■	■	■				
5. 人工バリア建設				■	■			
6. 人工バリア飽和					■	■		
7. ガス注入試験						■	■	
8. 人工バリア解体調査							■	■
9. 解析評価	■	■	■	■	■	■	■	■
10. 総合評価								■

(1) 原位置試験

原位置試験として、現実的な地質条件下で放射性廃棄物のサイロ型処分場を建設する場合を想定し、Figure 5.2 に示すように試験場内に高さ約 4.5m、直径約 4m のサイロ空洞を掘削、ベントナイト／砂の充てん材を現場締め固めし、サイロ内部にコンクリートサイロを構築、サイロ内を廃棄体の代わりに砂で充てんした。ガス移行は、内部の廃棄体の金属が腐食すると想定、コンクリート内部より注入するシステムとした。

まず、原位置試験を実施するスイスのグリムゼル試験場内で得られているボーリング調査データを収集・整理して、原位置試験を実施する場所としてサイロ空洞と破砕帯が交差する場所を選定した。さらに、選定した場所において 2 本のボーリング孔を掘削し、岩盤の水理・地質情報を収集した。また、試験の実現可能性を予備的に調べるために、二次元断面におけるガス移行解析を実施するとともに、コンクリートサイロの構造解析を実施し

た。

選定された場所において、周辺岩盤を傷めないよう配慮しながら、試験空洞の掘削を行い、掘削された空洞の寸法等の調査を実施した。また、空洞周辺の岩盤物性や水理特性を調査することを目的として、4本のボーリング孔を掘削した。また、人工バリアを構成するベントナイト／砂の混合材料(80:20)を用いた室内実験を行い、原位置試験で使用する材料、配合を決定した。

さらに、13本のボーリング孔を掘削し、周辺岩盤の力学的及び水理学的な特性調査を行い、周辺岩盤の透水・透気性及び力学特性を把握した。また、空洞内への地下水流入量の測定を実施し、二相流解析を実施するための境界条件や自然流入量による充てん材の飽和を予測するための基礎情報を得た。原位置試験以外では、室内試験としてモックアップ試験を実施し、原位置試験における計測機器の適用性及び、選定された材料・配合のベントナイト／砂充てん材中の透水・透気特性を把握した。

周辺岩盤の力学的及び水理学的な特性調査を行い、詳細な空洞周辺岩盤の特性を把握した。また、原位置試験の計測システムの検討を行い、原位置においてコンクリートサイロの構築および、ベントナイト系充てん材の施工を行うとともに、計測システムの設置を行った。これにより、計画された施工方法により、人工バリアの品質管理が可能であることが証明された。また、次年度から実施を予定している人工飽和～ガス注入試験計画の策定を行った。

施工された試験体の上部空洞を埋め戻し、コンクリートプラグにより閉塞し、水・ガス注入試験として人工バリアへの注水を開始した。さらに、設置された計測システムによる計測を開始し、計測データ及び計測システムの作動状況から、計測システムの設置方法が適切であったことを確認した。

さらに、人工飽和の途中経過のデータに基づいて、解析モデルの修正を行なうとともに人工飽和に関する解析を実施し、今後の試験計画の見直しを行なった。これにより、人工バリア及び周辺岩盤からなる解析モデルを構築した。(施工手順: Figure 5.3 参照)。

コンクリートプラグを構築し、ガス注入の準備段階として、注水による周辺岩盤と人工バリアの人工飽和を実施している。人工バリアの飽和後、サイロ内にガスを注入して人工バリア中を移行させる。

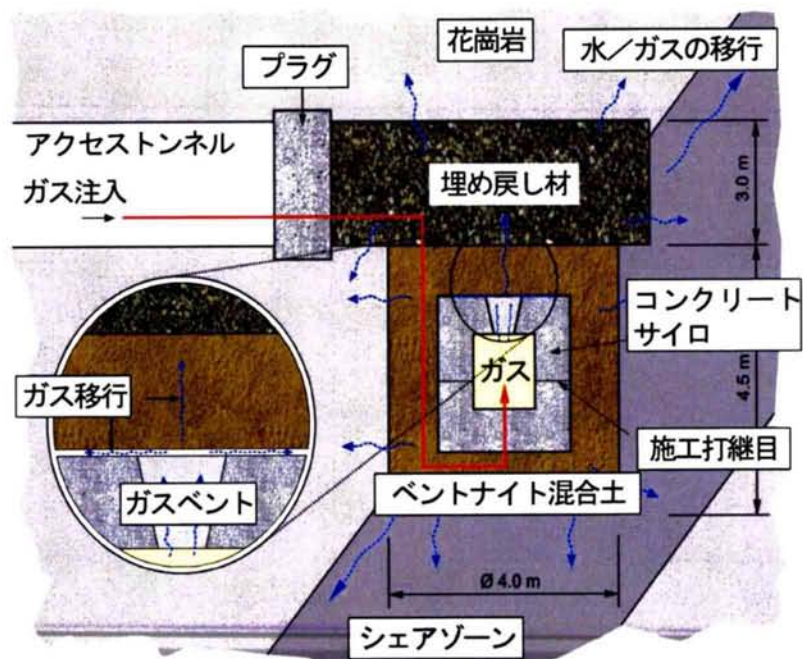


Figure 5.2 ガス移行挙動試験の原位置試験概念

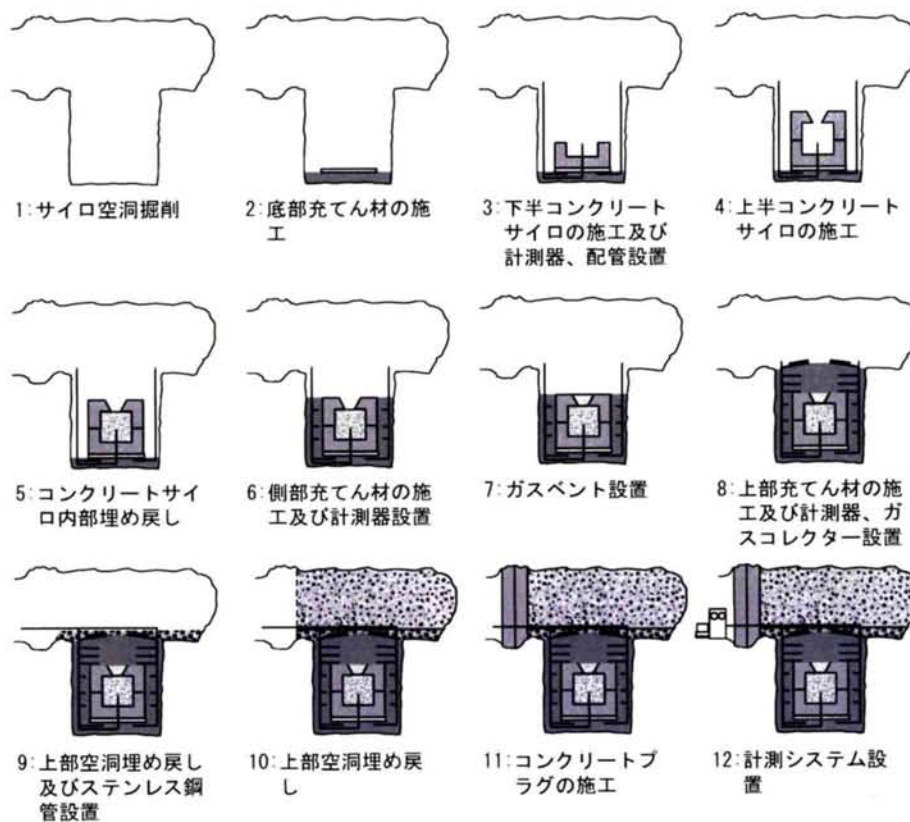


Figure 5.3 施工手順

(2) 室内試験

室内試験は、まず試験計画を実施し、人工バリア材料、ガスベント材料等の評価試験を実施し、さらに原位置試験に用いる材料の選定を行った。また、解析パラメータ取得、試験に用いる各種センサーの適用性試験等を行った。

(3) 解析

本研究では、実験を計画するための予察解析として、原位置試験の進行と室内試験結果を反映した解析を行い、試験計画の立案および見直しを実施するとともに、プロセス理解のために二相流解析と二相流+力学連成解析検討を実施している。

具体的には、解析モデルの検討として、ガス移行を評価可能な解析コードに関する文献調査を実施し、その結果を基に Tough2 及び Itough 二相流解析コードを選定し、人工バリアの飽和及びガス移行試験の予察解析を行い、その結果に基づいて計画を立案している。さらに、力学連成を含めた場合の解析コードとして Code-Bright を用い、原位置試験の結果を基に解析評価を行い、ガス移行に対するモデルの適用性を評価している。

5.2 原位置試験

5.2.1 アクセス坑道とサイロ空洞の掘削

人工バリア構築のための空洞掘削に当たり、所定の工法で所定の品質が担保できることを確認することを目的とする。具体的には、通常のトンネル掘削技術の範疇で掘削し、所定の品質管理を行った。GMT 用のアクセス坑道とサイロ空洞の掘削は、平成 10 年夏からグリムゼル試験場の南側で開始され、同年 11 月 30 日までで終了した。

サイロ空洞の掘削は、破碎帯が急角度でサイロと交差しており、破碎帯の破碎程度が大きく、粘着力が小さいこと、及び空洞壁面の損傷をできる限り回避すること、等の点から、静的破碎材を併用した工法を採用した。

スムーズ・ブラスティング工法を採用するとともにサイロの上部（破碎帯面に沿った割れ）での崩壊を防ぎ、サイロ壁面の荒さを最小にするため、発破の 24 時間前に静的破碎剤 Bristar を充填して岩にあらかじめ圧縮応力を与える工法を採用し、サイロ壁面の荒さを 10cm 以下に抑えた。

5.2.2 天然バリア（岩盤）に関する試験

天然バリアに関する試験は、1)地質を広く理解する、2)人工バリア建設における注意点があるか（湧水量、岩盤力学的な弱部）、3)人工バリアの飽和に十分な湧水は存在するか、4)周辺岩盤をモデル化する上で必要な物性値は得られているか、5)モデル化する上で十分な境界条件は得られているか、という観点から実施する。

具体的な試験項目は、①アクセス坑道とサイロ空洞の地質構造マッピング、②ボーリング抗を用いた水理試験（透水試験、EDZ 透水試験、岩盤透気試験）、③間隙水圧の長期モニタリング、④空洞全体の湧水量測定、⑤サイロ空洞近傍の 2 つのボアホールでの原位置地圧測定、である。

(1) アクセス坑道とサイロ空洞の地質構造マッピング

アクセス坑道及びサイロ側壁並びにサイロ天井部の地質学的マッピングと 4 本のボアホールを使った地圧測定等が行った。

Figure 5.4 にサイロ空洞のマッピングを示す。両側がアクセストンネル側で健岩部であり、中心に向かって半分程度の位置に数本の明確な割れ目とそこを境界として、破碎帯が見られる。こゑは、試験場所の選定に当たり処分場環境と類似した原位置として、破碎帯が含まれることとした条件を満足している。サイロの北側には破碎帯が存在し、サイロ周辺には湿った箇所が数カ所認められた。GMT サイトは、約 10m の厚さと 100m 以上の幅を持ち、ほぼ垂直な傾斜を持っている破碎帯の南側境界に位置する。

サイロの南側は、概して“弱く変形した花崗閃緑岩（Granodiorite）”が、また、サイロ中央には“中程度に変形した花崗閃緑岩”が分布している。サイロ壁面の半分程度は破碎帯で占められており、湧水状況は、壁面が常に湿っている程度で、サイロ周辺の数カ所で地下水流出点が確認されている。一方、健岩部は、完全に乾燥していた。

平成 10 年度に新たに掘削されたボーリング孔 GMT98-001 と GMT98-003 は、垂直に掘削され、GMT98-002 と GMT98-004 は、傾斜角 45 度で、下方向に掘削されている。以下、ボーリングの番号が GMT_{oo-ooo} と示されるが、最初の oo は、年（98 は、1998 年に掘削）、次の ooo は、その年の掘った順番である。

これらのボーリング孔から採取したコアの写真撮影と観察から、各孔の地質構造の概要は、以下の通りである。

GMT98-001：サイロ下部空洞の南側の鉛直ボーリング孔で、サイロ空洞壁面から 1m の位置にある健岩部。コアは、健全な花崗閃緑岩で、少数の微小亀裂を含む。ボーリング孔中には明らかな亀裂面は認められなかった。

GMT98-002：サイロ下部空洞の東側に位置する傾斜角 45 度を持つボーリング孔で、北からの方向角 348 度、20 度の角度で主破碎帯と交差している。ボーリング孔の最初の 1m 区間

では、微少の亀裂が存在し、それより深い区間では、強い変形作用を受けた花崗閃緑岩中に、多くの亀裂面が観測されていた。また、1.4m 以深は破碎帯中にあることが確認されている。

GMT98-003：サイロ下部空洞北側に位置した鉛直ボーリング孔で、この孔は破碎帯の水理・力学試験測定をするために設定されたボーリング孔で、全体は亀裂密度の高い破碎帯に位置している。

GMT98-004：サイロ下部空洞の西側に位置する傾斜角 45 度のボーリング孔。このボーリング孔は、0.95m で破碎帯と交差し、それ以深は、すべて破碎帯中にある。なお、最初の 50cm 区間は亀裂密度が高く、これはサイロ上部空洞掘削時の発破の影響と思われる。

Figure 5.4 サイロ空洞の地質マップ

(2) ボーリング孔を用いた水理試験（透水試験、掘削ゆるみ領域透水試験、岩盤透気試験）

水理学試験と間隙水圧の長期モニタリングが GMT サイト周辺の Table 5.4 および Figure 5.5, Figure 5.6 に示すボーリング孔で実施された。水理試験は、1) サイトの主要な構造要素の水理学的性質を決め、2) GMT 坑道掘削前後の破砕帯中の間隙水圧分布を測定し、3) 掘削前の掘削影響領域も含めたサイロ空洞の近傍における岩盤の水理学的特性を取得すること、を目的とした。実際の試験項目とボーリング孔を Table 5.5 に示す。

ボーリング孔における高透水部を概略評価する目的で、フロー・ロギングを実施した (Table 5.6)。また、EDZ の透水性を評価する目的で短パッカー (15cm 程度の短区間) で透水試験を行い、透水計量係数を算出している (Table 5.7)。二相流解析で重要なパラメータについても透気試験を行い、ガスエントリ圧および透気係数を算出している (Table 5.8)。ボーリング孔 GMT97-001 と GMT97-002 を用いた長期の透水試験を実施した結果、GMT97-001 孔では、透水係数として 1.0×10^{-9} (m/s)、GMT97-002 孔では、 $1.5 \sim 2.4 \times 10^{-10}$ (m/s) であった。平成 10 年度に掘削したボーリング孔 GMT98-001～GMT98-004 で測定された透水試験結果をに示す。GMT98-001～003 の 3 本のボーリング孔での透水係数は、 $2.6 \times 10^{-9} \sim 3.6 \times 10^{-10}$ (m/s) である。

健全な岩盤部 (GMT98-001) と破砕帯部 (GMT98-002、GMT98-003) の透水性が同等であった。また、これら 3 本のボーリング孔から採取したコアの観測結果からは、顕著な損傷域が認められなかった。GMT98-004 (破砕帯部) における試験では、透水係数も他のボーリング孔の測定結果より約 1 桁低く、 $6.5 \sim 7.6 \times 10^{-11}$ (m/s) であった。なお、表中の記号を以下に示す。

IARF：無限放射状流れ

PSR：初期圧力安定期

HI：定水圧注入試験

HIS：定水圧注入からの回復試験

RI：定水量注入試験

RIS：定推量注入からの回復試験

Table 5.4 ボーリング孔の位置と方向

ボーリング孔	位置 Table 5.4	削孔長(m)	口径(mm)	アジマス*(°)	傾斜(°)
VE 88.001	VE-tunnel m 487.40	28.12	86	357.00	-43.00
VE 88.002	VE tunnel m 488.45	29.88	86	338.31	5.13
GMT 97.001	VE-tunnel m 482.0	14.29	86	299.00	22.00
GMT 97.002	VE-tunnel m 482.0	13.00	86	299.00	-40.00
GMT 98.001	マトリクス部	6.30	101		-89.54
GMT 98.002	マトリクス部	6.21	86	344.34	-43.46
GMT 98.003	せん断域	6.10	101		-89.67
GMT 98.004	マトリクス部	6.00	86	309.28	-43.73
GMT 99.001	上部サイロ空洞（底面）マトリクス部	2.60	86	0.00	-70.00
GMT 99.002	上部サイロ空洞（底面）マトリクス部	2.90	86	326.99	-60.00
GMT 99.003	上部サイロ空洞（天井）せん断域	2.00	86	335.02	39.98
GMT 99.004	上部サイロ空洞（天井）せん断域	1.65	86	150.03	80.01
GMT 99.005	アクセス坑道	10.74	86	322.07	-34.75
GMT 99.006	アクセス坑道	6.44	101	232.91	-4.47
GMT 99.007	サイロ空洞	1.56	50	154.52	0.00
GMT 99.008	サイロ空洞	1.55	50	117.89	1.18
GMT 99.009	サイロ空洞	1.55	50	314.71	-2.74
GMT 99.010	サイロ空洞	2.00	35	227.39	-2.12
GMT 99.011	サイロ空洞	2.20	35	121.35	-1.72
GMT 99.012	サイロ空洞	2.20	35	149.97	81.49
GMT 99.013	サイロ空洞	2.20	35	342.32	40.78

* アジマス：基準からの水平方向角度

Table 5.5 各ボーリング孔における調査項目

ボーリング孔	ロギング			パッカー試験			長期観測		
	コア観察	ボアホールテレビ	掘削後応力	フローロギング	EIDZ透水試験	透気・ガスしきい圧試験	水頭・圧力	ガス分析	TDR計測
VE 88.001	○						○		
VE 88.002	○						○		
GMT 97.001	○						○		
GMT 97.002	○								
GMT 98.001	○	○	○	○			○		
GMT 98.002	○	○		○		○	○		
GMT 98.003	○	○	○	○			○		
GMT 98.004	○	○		○		○	○		
GMT 99.001	○							○	
GMT 99.002	○							○	
GMT 99.003	○							○	
GMT 99.004	○							○	
GMT 99.005	○	○		○		○	○		
GMT 99.006	○	○	○	○			○		
GMT 99.007	○				○		○		
GMT 99.008	○						○		
GMT 99.009	○				○		○		
GMT 99.010									○
GMT 99.011									○
GMT 99.012									○
GMT 99.013									○

Table 5.6 ボアホールにおけるフロー・ロギングの結果の要約

	GMT 98.001	GMT 98.002	GMT 98.003	GMT 98.004	GMT 99.005	GMT 99.006
試験区間数	5	11	5	11	11	4 *
最小透水量係数 (m ² /s)	1.3E-11	1.5E-11	1.1E-09	8.0E-13	4.4E-12	1.1E-11
最大透水量係数 (m ² /s)	3.6E-11	7.1E-09	4.7E-08	1.1E-08	1.1E-10	1.8E-10
平均透水量係数 (m ² /s)	2.5E-11	1.4E-09	1.7E-08	1.0E-09	4.3E-11	1.1E-10
平均透水係数 (m/s)	2.0E-11	2.4E-09	1.4E-08	1.7E-09	7.4E-11	1.3E-10
掘削前の透水係数 (m/s)	1.7-2.6E-9	1.9-2.6E-9	0.3-1.0E-9	0.7E-10	N/A	N/A

Table 5.7 GMT 99.007 and 99.009 における E D Z 試験の結果要約

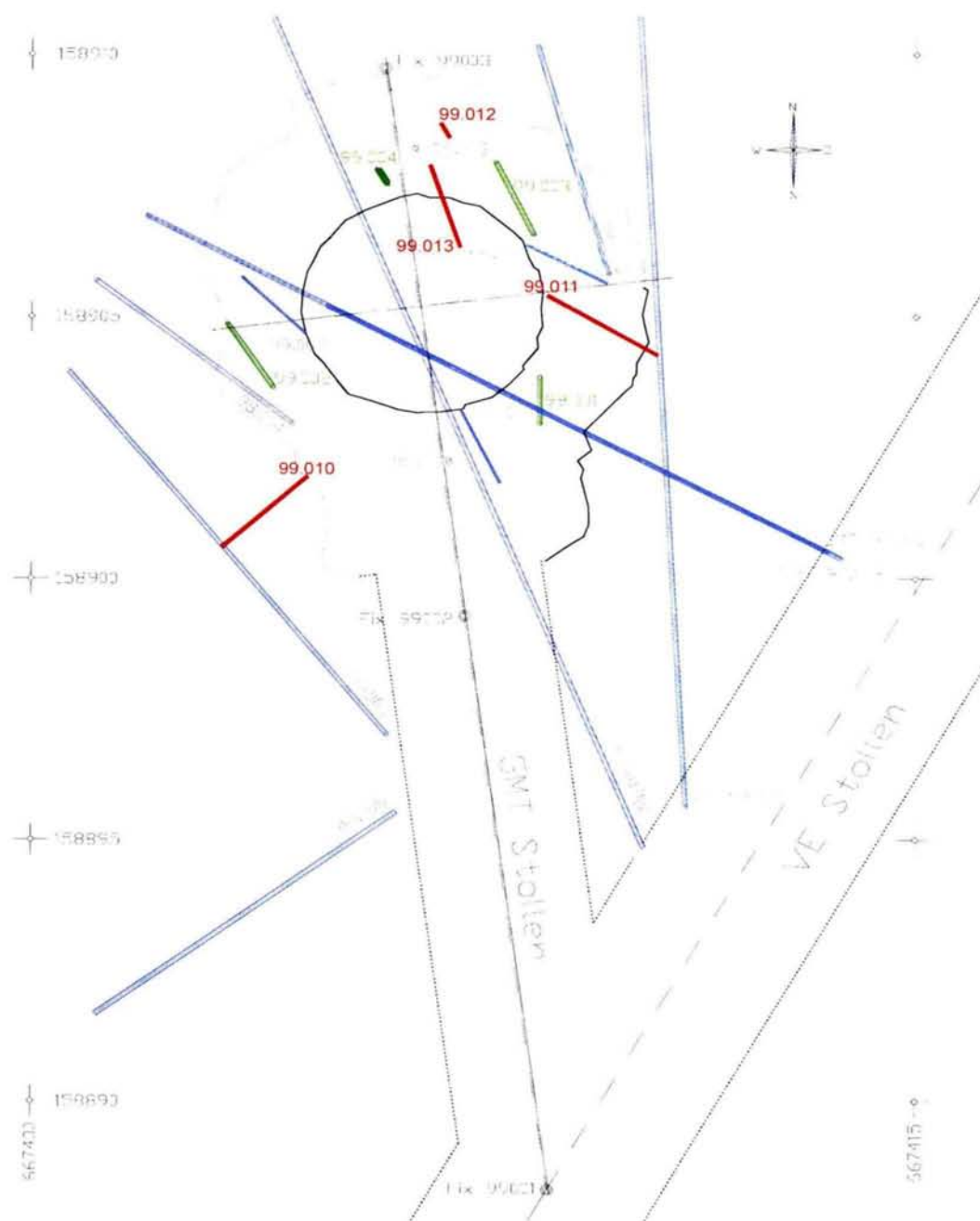
試験 No.	試験区間上端位置 (ボーリング孔口 からの距離:cm)	試験区間下端位置 (ボーリング孔口 からの距離:cm)	区間長 (cm)	透水量係数 (m ² /s)	解析試験 フェーズ
<i>Borehole GMT 99.007</i>					
99.007 TOP21	22.8	37.6	14.8	7.3E-12	パルス注入
99.007 TOP4	42.8	57.6	14.8	4.6E-10	パルス注入
99.007 TOP5	52.8	67.6	14.8	3.1E-10	パルス注入
99.007 TOP6	65.8	80.6	14.8	3.9E-10	パルス注入
99.007 TOP7	22.8	37.6	14.8	2.3E-11	パルス注入
99.007 INTP12	38.2	55.6	17.4	4.9E-10	パルス注入
99.007 INTP5	78.2	95.6	17.4	3.6E-12	パルス注入
99.007 BOT2	75.9	95.6	19.7	5.6E-12	パルス注入
99.007 BOT4	95.9	115.6	19.7	1.6E-12	パルス注入
99.007 BOT8	39.4	59.1	19.7	6.03E-10	パルス注入
<i>Borehole GMT 99.009</i>					
99.009 BOT2	105.9	125.6	19.7	1.9E-12	パルス注入
99.009 BOT3	95.9	115.6	19.7	2.5E-12	パルス注入
99.009 INTP1	87.2	104.6	17.4	7.1E-12	パルス注入
99.009 INTP2	78.2	95.6	17.4	8.9E-12	パルス注入
99.009 INTP3	68.2	85.6	17.4	2.5E-11	パルス注入
99.009 INTP4	53.2	70.6	17.4	1.9E-11	パルス注入

Table 5.8 岩盤の透気試験

ボーリング 孔／試験 No.	試験区間の深 度	解析結果
GMT 98.002 LTT1	3.91 - 4.44 m	<p>水理：IARF 区間は明確でない。2重モデルは、内側領域の透気係数 $6.6\text{E-}8\text{m}^2/\text{s}$、透気係数 $6.6\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ と評価した。代わりに、終盤時刻の反応は、一定圧力境界の評価ができた。</p> <p>ガス：データはノイズが大きかったが、ガスエントリ圧 96kPa が、画像評価により得られた。</p>
GMT 98.002 LTT2	4.20 - 4.73 m	<p>水理：IARF 区間は明確でない。2重モデルは、一定圧境界から 3 m の距離で、内側領域の透気係数 $3.8\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$、外側領域 $3.8\text{E-}8\text{m}^2/\text{s}$ と評価した。</p> <p>ガス：ガスエントリ圧 24kPa が、画像評価により得られた。</p>
GMT 98.004 LTT1	1.74 - 2.27 m	<p>水理：IARF 区間は明確でない。2重モデルは、内側領域の透気係数 $4.8\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$、外側領域 $1.6\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ と評価した。</p> <p>ガス：ガスエントリ圧 56kPa が、画像評価により得られた。</p>
GMT 99.005 LTT1	9.45 - 9.98 m	<p>水理：外挿によって、定常的なフォーメーション圧 299kPa が得られた。IARF 区間は明確でない。モデルは、ボーリング孔のスキンと、試験区間の透気係数 $1.0\text{E-}9\text{m}^2/\text{s}$ に適合した。</p> <p>ガス：ガスエントリ圧 262kPa が、画像評価により得られた。</p>
GMT 99.005 LTT2	6.52 - 7.05 m	<p>水理：IARF 区間は明確でない。モデルは、ボーリング孔のスキンと、試験区間の透気係数 $1.7\text{E-}10\text{m}^2/\text{s}$ に適合した。</p> <p>ガス：ガスエントリ圧 373kPa が、画像評価により得られた。</p>

Table 5.9 長期透水試験 (GMT 98-001~98-004) の結果

試験区間	試験期間と試験方法 (日)	圧力 Pi (kPa)	透水量係数 T (m ² /s)	透水係数 K (m/s)
GMT 98-001 (健岩部)	7 PSR	70	—	—
	2 RI		1.8E-8	2.6E-9
	7 RIS		7.0E-9	1.7E-9
GMT 98-002 (破碎帯部)	5 PSR	85	—	—
	1 RI		1.1E-8	1.9E-9
	7 RIS		1.5E-8	2.6E-9
GMT 98-003 (破碎帯部)	5 PSR	85	—	—
	1 RI		6.0E-9	1.0E-9
	7 RIS		2.1E-9	3.6E-10
	1.5hr HI		5.6E-9	9.6E-10
	1.5hr HIS		3.4E-9	5.8E-10
GMT 98-004 (破碎帯部)	1 PSR	187	—	—
	3 HI		3.7E-10	6.5E-11
	23 HIS		4.3E-10	7.6E-11
			4.1E-10	7.2E-11



長期観測ボーリング孔は青
TDRボーリング孔は赤
ガス採取ボーリング孔は緑

Figure 5.5 試験空洞内のボーリング孔の平面レイアウト

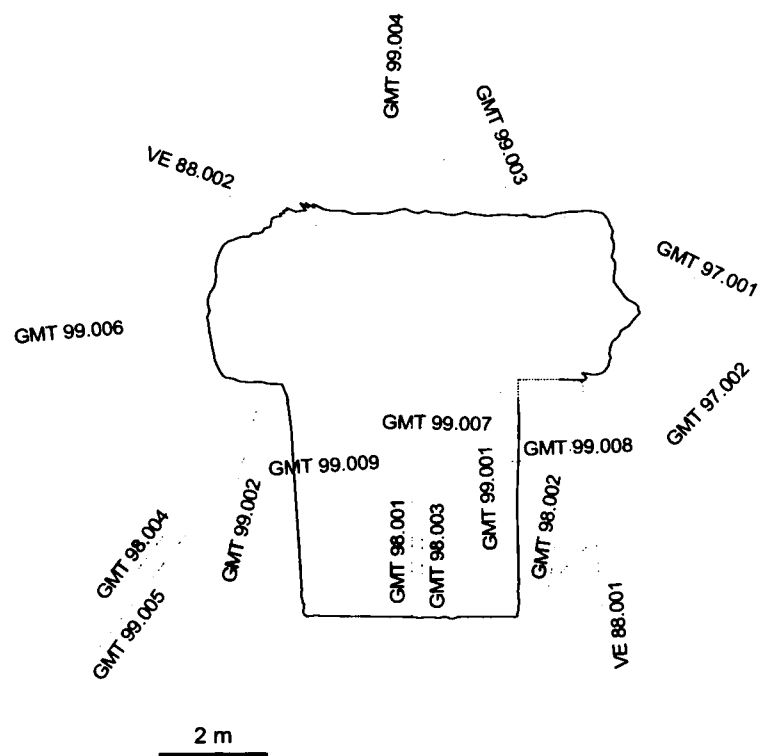


Figure 5.6 試験空洞内のボーリング孔の断面レイアウト

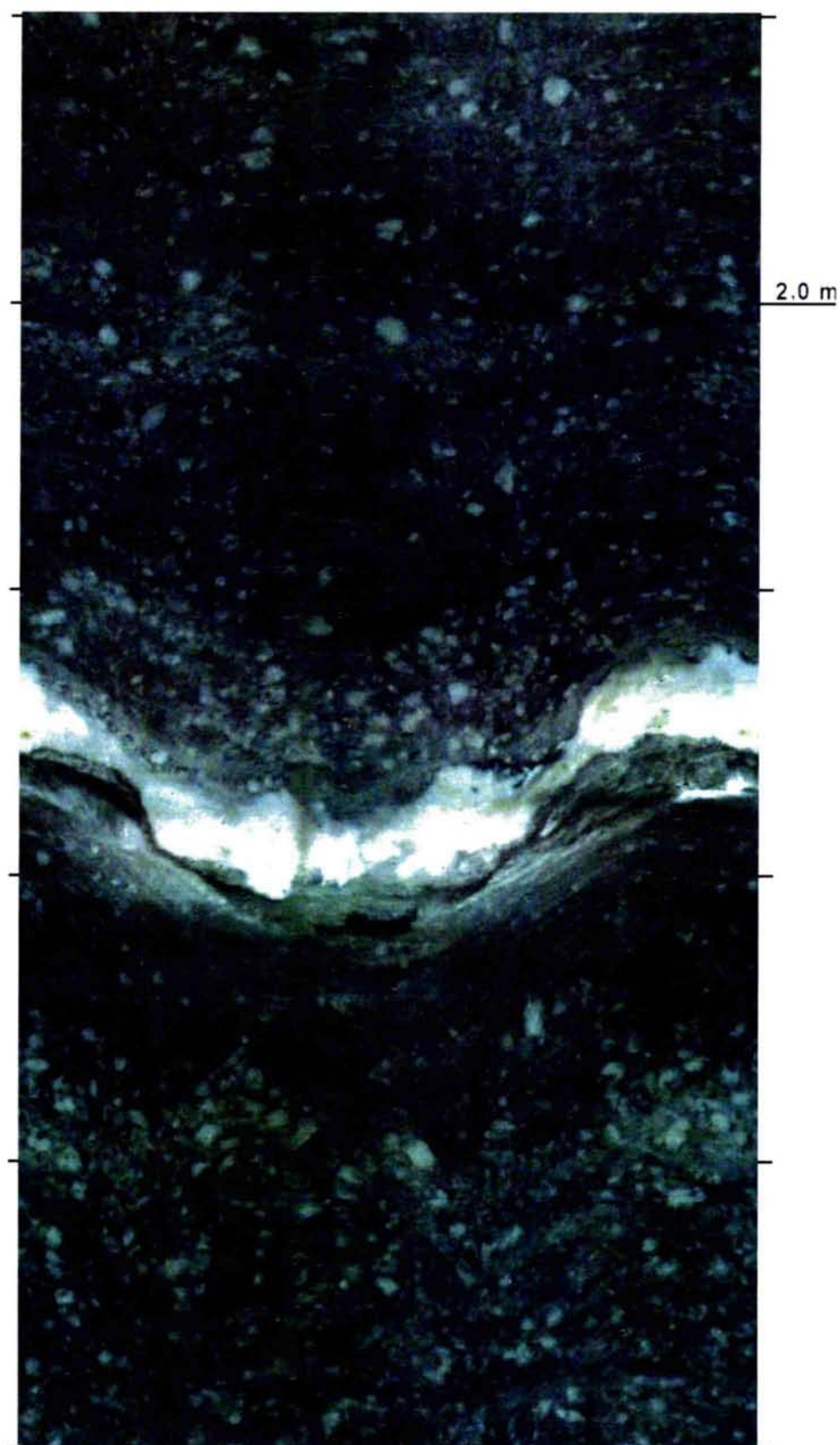


Figure 5.7 GMT 98.004 の画像観測（区間 1.9 から 2.3m）

(3) 間隙水圧の長期モニタリング

ボーリング孔を用いて長期の間隙水圧を測定した。本試験は、ガス移行試験の数値モデルを作成し、サイロ空洞掘削の影響を観測するため、ガス移行試験前の初期条件および境界条件を取得し、試験中の観測を行うことを目的としている。(Figure 5.4)

GMT では 21 本のボーリングに対して、マルチパッカーシステムを設置した。長期圧力計測は現地での作業終了後から継続的に行っている。3 月 22 以降、24 区間で行っている。なお、人工飽和システム設計の注水試験のため一時的に試験が中断することがあった。

計測の結果、得られた結論は次の通りである。

- ・ 注水試験の前にはほとんどのボーリング孔で圧力は安定していた。
- ・ 注水試験期間以外では次の区間での圧力は大気圧に近い値であった。(GMT98.001 I1, I2; GMT998.002 I1, I2; GMT98.003 I1, I2; GMT98.004 I1, I2; GMT99.005 i1; GMT99.007 I1, I2; GMT99.008 I1, I2; GMT99.009 I1, I2)
- ・ 注水試験期間以外での上記区間での圧力の変動は水圧ではなく大気圧の変化によるものと思われる。
- ・ 次の区間では注水試験中に相互影響が見られなかった。(GMT98.001 I1; GMT99.005 I3; GMT99.006; GMT99.007 I1, I2; GMT99.008 I1, I2; GMT99.009 I1, I2)

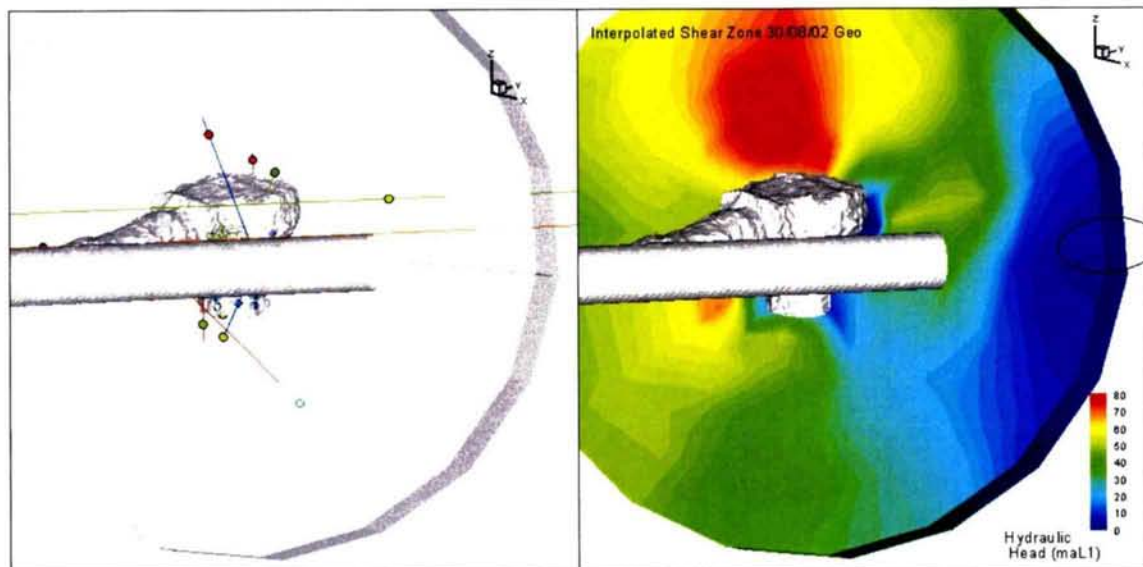


Figure 5.8 間隙水圧計測から内挿、外挿した地下水圧力分布：解析モデルの境界条件

(4) 空洞全体の湧水量計測

空洞への湧水量測定は、1)マクロな岩盤の透水性を知る、2)人工バリアを所定の試験期間中に飽和させるだけの量が湧水されるか、3)人工バリアの施工に支障のあるような湧水量か、を判断するために実施した。湧水量測定概念を Figure 5.9 に示す。飽和状態でのサイロ空洞への全湧水量とその空間分布を計測するため、平成 12 年 2 月より湧水計測を開始した。また、パネルを使った流量測定は平成 12 年 2 月から 8 月まで行った。湧水量測定のレイアウトを Figure 5.10 に示す。

1 月末に全面積 7.4m² のプラスチックパネル P1、P2 を GMT 空洞上部に取り付けた。P1 と P2 パネルはそれぞれ 5.4m²(1.8m×3.0m)の大きさで、破碎帯の浸出箇所に取り付けた。ビニールシート P3 は天井のマトリックス部に取り付けた。P1、P2 での浸出水は小さなビンに集め、定期的に計測した。その他に空洞底部にポンプを設置し、7 日毎に排水し、水量を計測した。

湿った点あるいは滴下点からの流入水を定量化（蒸発量計あるいはプラスチック・パネルでの計測が不可能）するために、吸湿紙を用いた方法を採用した。

寸法 33cm×53cm の吸湿紙を、流入率に応じて設定した 15 分～2 時間、岩盤表面に密着させた。計測期間の増加に応じて計測を繰り返して行う。流入率が最初に安定した後に計算した流入率を、Table 5.10 に示す。流入は、乾燥紙と湿潤紙の重量差から、密着させた時間に応じて計算する。サイロ上部空洞に設置された吸湿紙、プラスチックシートを Figure 5.11 に示す。

試験空洞内で、目視できる流入点が 5 箇所識別されている。それぞれの位置での流入率は、0.3～0.8 L/day の間にある (Table 5.10)。実際の計測においては、凹凸を有する岩盤の表面と吸湿紙との接触が完全とは言えないことから、最小値と考えている。湧水量計測期間中は岩盤を飽和させるため、空洞を閉鎖した。EDZ（掘削影響領域）水理試験を開始したため、Table 5.11 に示す湧水量には、この期間にポンプで排水した水量には注水が含まれ、自然湧水だけではない。

GMT 空洞内へ湧水量は全体で 5l/日であり、このうち 1.2l/日は破碎帯から、0.8l/日はマトリックス部からの流入水であり、3l/日は底部からの湧水量である。Figure 5.12 に湧水量の経時変化を示す。

Table 5.10 吸湿紙を使用した流入率の定量化

配置 No	重量差 (g)	接触時間 (h)	流入率 (L/day)
AP-1	36.40	1.00	0.87
AP-2	4.70	2.16	0.05
AP-3	15.00	2.00	0.18
AP4	17.30	1.25	0.45
AP5	3.00	0.25	0.29

Table 5.11 サイロへの湧水点 (滴下点)

Date	No1 パネル-5.4m ² 天井せん断域(東) (litre/day)	No2 ハネル-5.4m ² 天井せん断域(西) (litre/day)	No3 プラスチック フォイル-1.95 m ² 天井マトリクス部 (litre/day)	ポンプ サイロ 下部空洞底部 (litre/day)	総合流入量 (litre/day)
14. 2. 2000	0.83	0.33	0.58	1.86	3.67
16. 2. 2000	0.98	0.39	0.90		
21. 2. 2000	0.89	0.37	0.66	2.19	4.11
24. 2. 00	0.62	0.25	1.42		
28. 2. 00	0.62	0.33	0.60	2.54	4.10
03. 3. 00	0.74	0.38	0.74		
06. 3. 00	0.87	0.47	0.82	2.46	4.61
08. 3. 00	0.75	0.36	0.74		
10. 3. 00	0.82	0.41	0.72		
13. 3. 00	0.92	0.49	0.73	2.16	4.31
15. 3. 00	0.92	0.49	0.73		
17. 3. 00	0.80	0.42	0.70		
20. 3. 00	0.83	0.50	0.73	1.99	4.05
23. 3. 00	0.78	0.34	0.70		
平均	0.79	0.37 駁	0.75	1.88	3.80

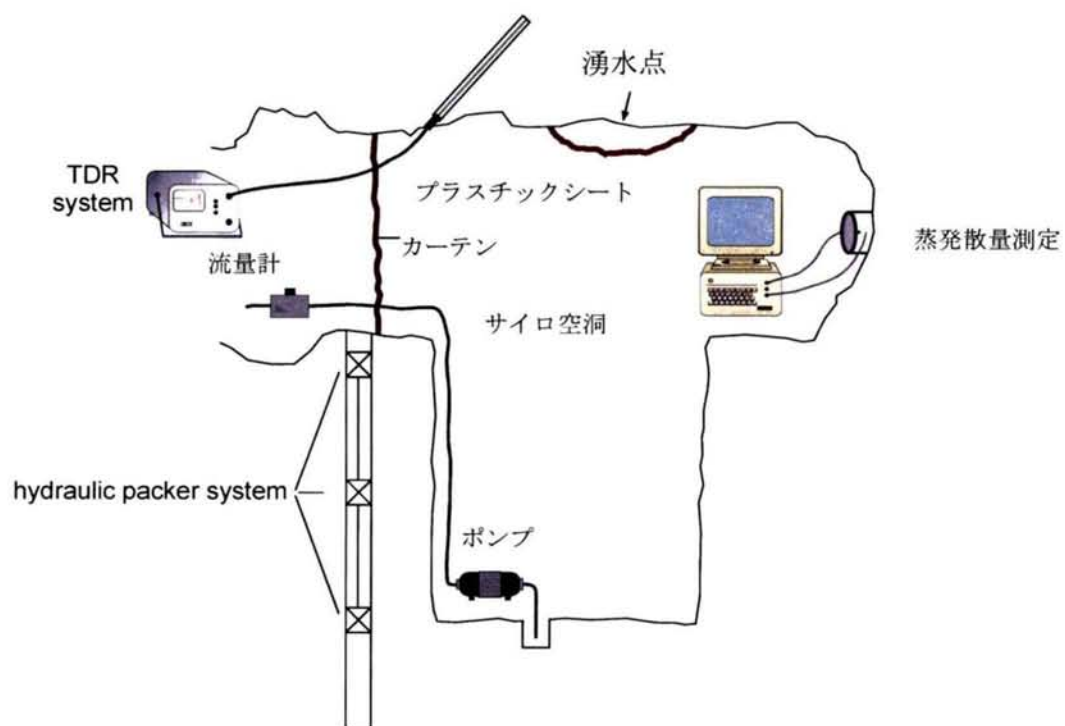


Figure 5.9 湧水量測定の方法

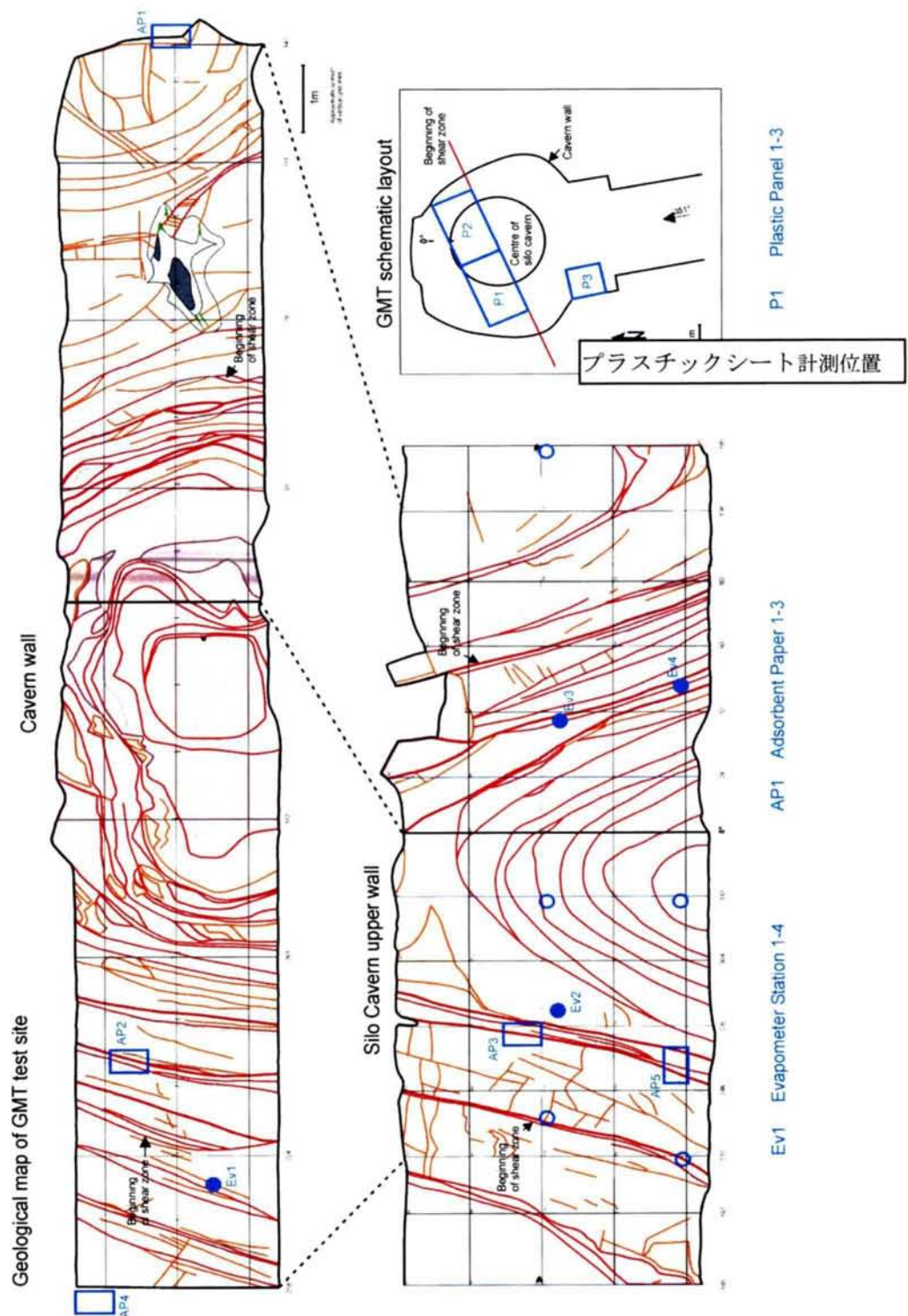


Figure 5.10 湧水量測定位置

- 吸湿紙
- 蒸発量計

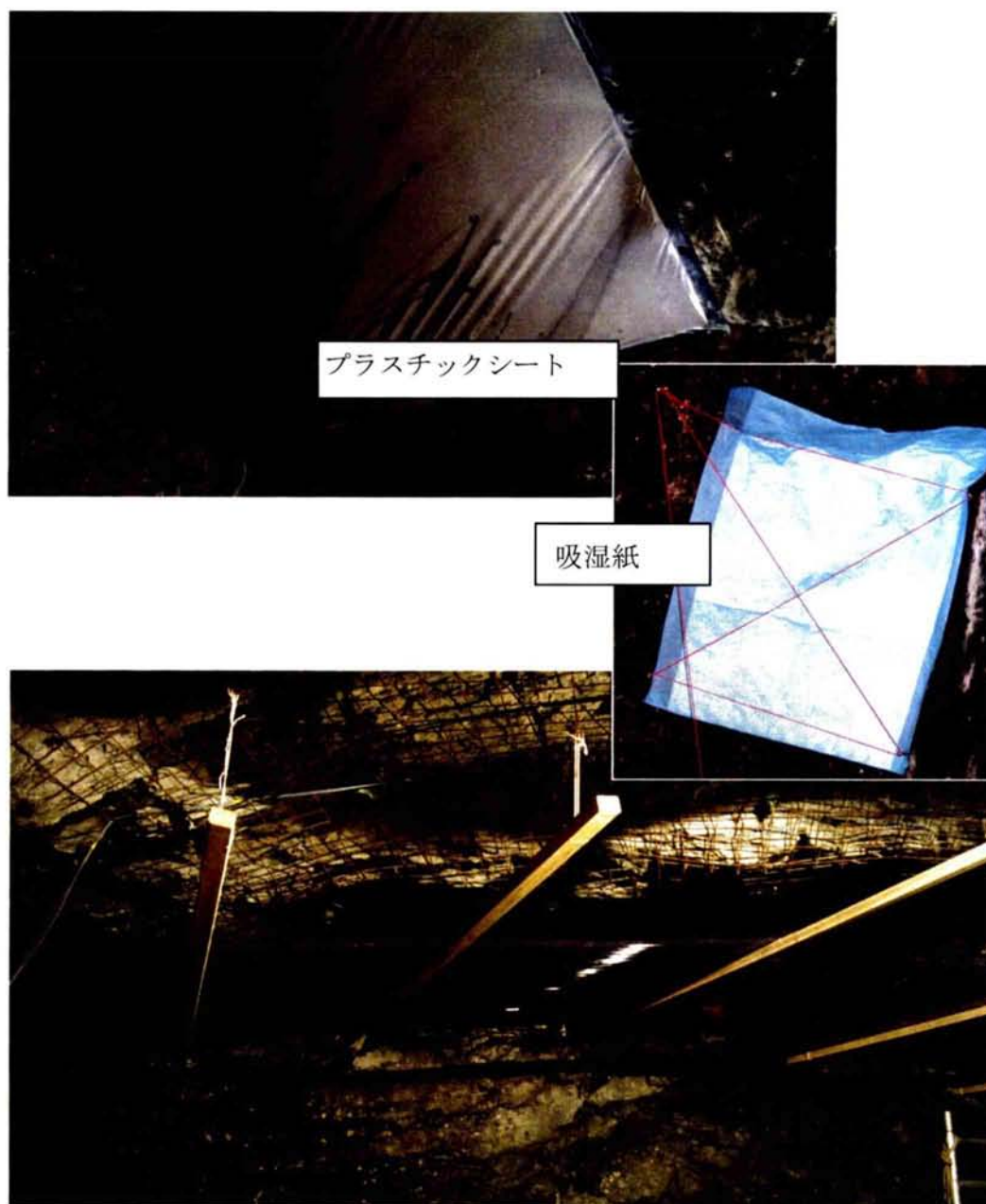


Figure 5.11 湧水測定状況

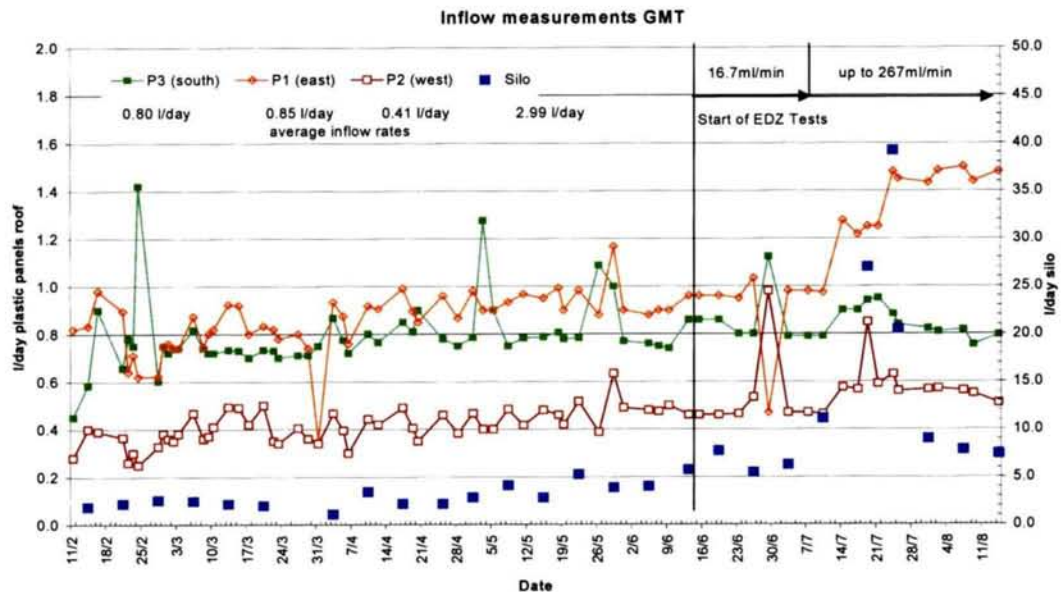


Figure 5.12 空洞流入量計測値の経時変化

(5) サイロ空洞近傍の2つのボアホールでの原位置地圧測定

サイロ下部空洞掘削前に、サイロ空洞に削孔された2本の鉛直ボーリング GMT98-001 及び GMT98-003 において原位置応力測定試験を実施した。

応力測定には、ボアホールスロット・プローブを使用した。このスロット・プローブは、ボーリング孔壁面にボーリング孔と平行にスロットで切れ目を入れ、その際に局所的な応力の再配分によって生じる変形（元に戻ろうとする、ボーリング孔に垂直な面での応力）をひずみ計で測定する方法である。その結果を、深度を横軸に、応力を縦軸にして Figure 5.8 に示す。GMT98-001 では、平均の最大主応力方向は、107 度で、およそアクセス坑道と垂直な位置関係にあり、平均応力値は 12.7MPa であった。

GMT98-003 孔では、最大主応力方向は 145 度で、平均応力は、19.9MPa であった。2つのボーリング孔での応力値の違いは、それぞれの VE トンネルに対する相対的な位置及びアクセス坑道における位置の違い（遠近）、即ち、GMT98-003 がサイロ上部空洞の奥に位置し、坑道先端部のため、掘削の影響が少なく、GMT98-001 と比較して応力値が大きかったものと考えられる。

5.2.3 人工バリアの建設

人工バリアの建設に当たっては、所定の施工方法で所定の品質が担保できることを確認するとともに、人工バリア中のガス移行を評価できる計測システムを設置することを目的とする。人工バリアは、高さ 2.5m、直径 2.5m、厚さ 0.5m のコンクリートサイロとその周辺の厚さ 0.75m の充てん材（ベントナイト・砂の混合土、混合比 20:80）によって構成されている。また、ガス移行挙動を把握するために、間隙水圧計とともに TDR（飽和度を比誘電率として把握：Time Domain Reflectometry）を配置している。また、ガス移行経路を同定するためにガストレーサーを用いている。

コンクリートサイロの施工及び充てん材の施工について以下に示す。

(1) コンクリートサイロの施工

コンクリートサイロに用いるコンクリートの要求性能及び施工条件として、①設計基準強度 30MPa（材令 28 日）、②透水係数 10^{-10}m/s （材令 28 日）、③ひび割れ発生を防ぐため、低発熱であること、④ブリーディングによる内部欠陥を防ぐため、ブリーディング率 2%以下、⑤ワーカビリティを必要な時間保持する（目標スランプ 12cm）、⑥打継目を設ける（コンクリートサイロ底面から 1.25m に打継目を設ける）、⑦セパレータを使用しないこととした。施工状況及び全景を Figure 5.13, Figure 5.14 に示す。

要求性能を満足する配合は試験練りにより決定した（Table 5.2 参照）。また、試験場とコンクリートプラントが離れ、コンクリートの製造から打設まで時間を要するため遅延剤を添加した。打継目は、高圧水による洗浄、湿潤化を行い十分な処理を行なった。さらに、セパレータをなくすため、型枠を外部支保工により固定した。これらの対処により、要求条件を満足する品質のコンクリートサイロの構築ができた。

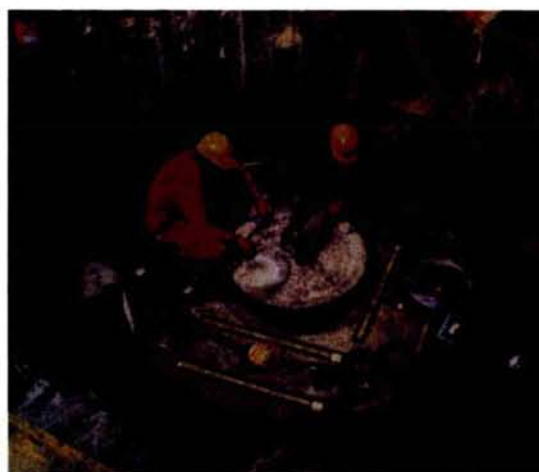


Figure 5.13 コンクリートサイロ全景



Figure 5.14 コンクリートサイロ施工状況

(2) 充てん材の施工

充てん材として用いた材料は、ベントナイト（クニゲル V1）／砂（スイス産の珪砂）の乾燥重量比を 1:4 とし、練混ぜ時の含水比を 11%としたものである。室内試験を行い最大密度が得られる含水比の設定を行った。充てん材の製造は、容量 1m³ のミキサーを用い、現地で練混ぜを行った（Figure 5.15 参照）。

締固めには、電動式転圧機を使用した（Figure 5.15Figure 5.17 参照）。締固めの品質管理として、予備試験を実施し、転圧時間を 5 分/m² と設定し、撤出し厚と締固め後の層厚により管理した（Figure 5.18 参照）。さらに、30～76cm 毎に規定されている計測機器設置レベルにおいて、4～5 箇所で砂置換法（JIS A 1214）による原位置密度試験を行なった（Figure 5.19 参照）。充てん材の品質管理試験結果の一例として、締め固め前の砂の含有率および含水率の結果を Figure 5.20 に示し、充てん材の上半部における計測箇所と原位置密度（湿潤密度）及び体積含水率の測定結果を Figure 5.21 に示す。図に示すように、湿潤密度は 1.8～2.0（g/cm³）の範囲にあり、管理基準（湿潤密度 1.75g/cm³ 以上）を満たしており、目標品質を十分に満足する施工ができた。



Figure 5.15 充てん材の練り混ぜ状況



Figure 5.16 充てん剤の締め固め状況（底版）



Figure 5.17 充てん材締め固め状況（側壁）



Figure 5.18 締め固め後の高さ確認



Figure 5.19 砂置換法（JIS A 1214）による原位置密度試験

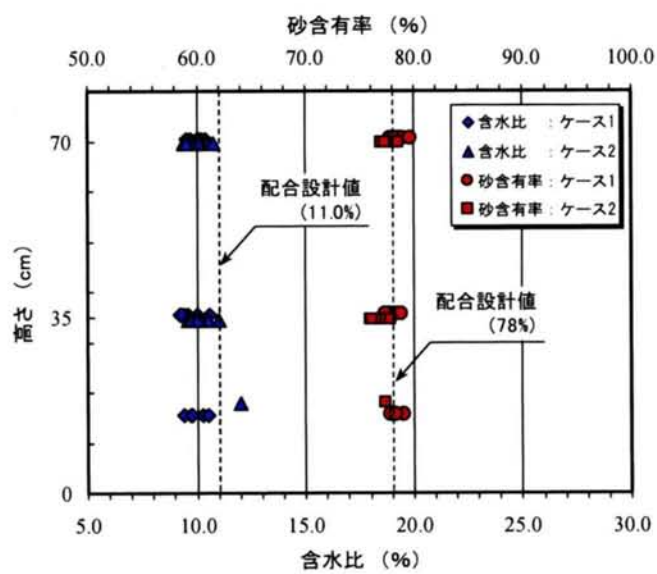


Figure 5.20 施工前サンプルの品質確認

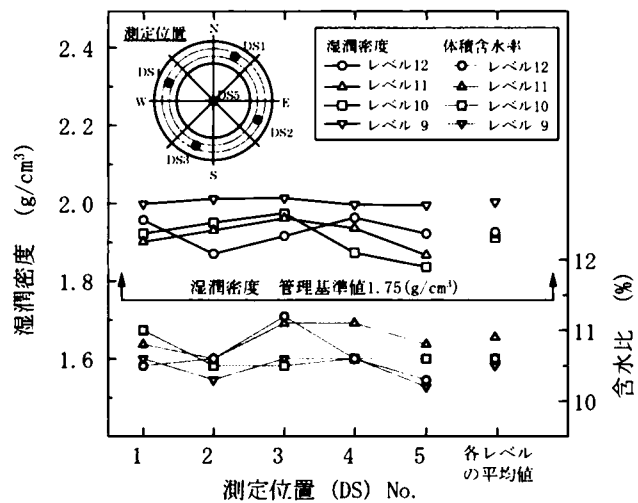


Figure 5.21 施工後の密度（品質確認）計測結果

(3) 計測機器の設置

充てん材及びコンクリート内に Table 5.12 に示す計測器（合計 203 点）を設置した。また、TDR（Time Domain Reflectometry sensor）は、充てん材の水分量を測定することが可能で、充てん材の飽和時やガス移行時の飽和度の確認のために設置した。また、全応力計はベントナイトの膨潤圧の計測に、間隙水圧計は水あるいはガスの移行を評価するために使用している。さらに、空洞上部、下部、サイロ内、岩盤内には人工飽和用の注水配管、コンクリートサイト内には、ガス注入用の配管を設置した。ここで、光ファイバーセンサーは、ドイツの DBE TECHNOLOGY 社によって開発が進められている測定システムであり、原位条件下での人工バリア材料中における光ファイバーシステムの実証をおこなうことも目的の一つとしている。

計測のための各種ケーブル及び配管は、ステンレス鋼管を通し外部に引き出している（Figure 5.22 参照）。この際、ステンレス鋼管の内部及び周囲が水・ガスのみちとなることを防ぐため、ステンレス鋼内部をレジンで固めるとともに、ステンレス鋼管周辺にリング状に整形されたベントナイト等を取り付け止水対策を行なった（Figure 5.23 参照）。

Table 5.12 人工バリアの計測センサー一覧

測定項目	測定機器	場所	数量
間隙圧	圧力計	ベントナイト混合土	81
		サイロ内部	3
		上部空洞	12
温度	温度計	サイロ内部、充填材	10
相対湿度	湿度計	ベントナイト混合土	4
全応力	全応力計	ベントナイト混合土	11
含水率	TDR	ベントナイト混合土	50
		サイロ表面	12
		コンクリート打継ぎ	8
ガス組成	ガスサンプリングシステム	上部空洞	6
温度	光ファイバーセンサー	上部空洞	2
間隙圧		上部空洞	1
湿度		ベントナイト混合土	2
全応力		ベントナイト混合土	1



Figure 5.22 計測ケーブル用ステンレス管



Figure 5.23 計測装置の養生状況

5.2.4 人工飽和

平成 13 年 8 月より注水・飽和を開始、初期 5 ヶ月は、システムに過大な負荷をかけないよう徐々に注水、上部空洞が満水した時点で注水を停止した。平成 14 年 1 月から平成 15 年 1 月までの 13 ヶ月間、人工バリアを飽和を加速させるために、500kPa で加圧注水を行った。充てん材施工時の初期飽和度は 60～70%程度（初期含水率 11%に相当）であった。加圧注水開始から約 240 日後には充てん材の上部ではほぼ 85%以上になっている。

ガス移行の主な経路として予想される、人工バリアの上半部は当初の計画通り飽和が順調に進んでいる。しかし、下半部については、計測データを評価する限り飽和があまり進んでいない。この理由は、例えば上載荷重による密度上昇に起因する低透水性など、色々想定できるが、結論は解体調査を待って出す予定である。

5.3 室内試験

原位置試験の結果を信頼できるものとするため、また解析コードの適用性を評価するため、様々な室内試験を行い、データを取得した。

5.3.1 試験概要

室内試験は、大きく 1)材料選定のための試験、2)人工バリア材料及びガスベント材料の解析に必要なパラメータの取得試験、3)計測装置・測定方法の選定と基礎データ取得のための予備試験、さらに 4)システムとしての機能確認のためのモックアップ試験に分けられる。実施した室内試験の項目と主な成果について Table 5.13Table 5.14 に示す。室内試験ですべての解析条件が設定できる場合においても、寸法やシステムとしての挙動等については、現位置試験で得る予定である。

Table 5.13 室内試験概要総括表 (1/2)

試験名称	試験目的	充填材比較試験	測定装置・備試験			モックアップ試験	外周充填材定置技術確認試験
			トレース・サ適用試験	計測機器の適用試験	コンクリート中水分測定 の適用性		
試験項目	ベントナイト系充填材に用いるベントナイトの種類の決定	ベントナイト系充填材中のガス移行経路可視化のためのトレースの適用性の確認	各種計測機器の適用性の確認	コンクリート中水分測定時の乾燥時、飽和時の含水率	原位置試験の建設、計測計画のための種々の情報の取得、および数値モデルへの入力情報の提供	モックアップ試験	外周充填材定置技術確認試験
試験概要	クニゲルVI, MX-80, Serrataの3種のベントナイトを対象に以下の3段階の試験を実施 ・A段階 各ベントナイト充填材(混合比 B:S 20:80)に対する水理、物理特性調査(含水率、密度、粒形分布、締めめ試験、圧縮強度、透水係数および膨潤圧) ・B段階 A段階試験の結果よりベントナイトを1種選定し、混合比を変えた2種の試験体によりA段階と同様の試験を実施 ・C段階 A,B試験の結果に基づき、モックアップ試験に使用するベントナイトおよび混合比を設定し、2相流パラメータ取得のための吸水膨潤試験を実施	適用可能性のあるガス・トレースおよび反応性に対する要求性能 ・トレース・サと迅速に反応を終了し、明確に可視化可能な色であること ・空気、水、ベントナイト/トレース・サとの非反応性 ・反応条件がpH、酸化還元状態等に対して適度な範囲にあること	透明のPLEXIGLASハーフ(内径19cm、長さ65cm)にベントナイト充填材を充填し、以下の計測機器について適用性確認試験を実施 ・水およびベントナイト/コンクリートとの非反応性 ・水難溶性 ・染料に対する要求性能 ・トレース・サと迅速に反応を終了し、明確に可視化可能な色であること ・空気、水、ベントナイト/トレース・サとの非反応性 ・反応条件がpH、酸化還元状態等に対して適度な範囲にあること	・コンクリート中の水分測定用計測機器として、TDRを使用し、乾燥時、飽和時の含水率の変化を測定 ・コンクリート試験体は、硬化開始後約1ヶ月後、40℃で1週間飽和させ、次の1週間で飽和させる形態とし、各過程でTDR計測を実施した	計画中の材料、および計測機器に関して、以下の項目について試験(試験装置:内径54cm、高さ60cm)を実施 ・人工パリア建設:材料パラメータ、定置技術及び建設技術 ・計測機器の設置:センサの信頼性、設置技術、配置計画、ケーブル計の設計 ・ガス・水移行経路の理解:外周充填材の飽和、局部的飽和によるチャナリング モックアップ試験は次の4フェーズに分割 フェーズⅠ:試験体・装置の製作 フェーズⅡ:充填材及びセンサの設置 フェーズⅢ:飽和/ガス注入の実施 フェーズⅣ:トレース試験・解体調査	原位置試験の使用を予定しているミキサー、締めめ機を用いて、充填材の小スケール施工試験を実施 ・外周充填材の定置に関する既存手法、設備の適用性 ・混合土の造成可能な均質性、密度および含水率 ・原位置環境下での作業性 ・実環境下での作業環境(岩盤表面の凸凹、狭隙部での作業)の品質への影響 ・JIS A1214 砂質土 確認方法 原位置密度試験および、試験の均質性、含水比等の確認のため、室内分析を実施	選定されたベントナイト混合土の原位置条件を模擬した環境下での施工性、および品質の確認
得られた成果	・締めめ試験:動的プロベクタ試験と一軸圧縮の両者による試験の結果、3種の材料において、ほぼ同程度の乾燥密度を取得。他の方法ではクニゲルVIが最も高密度を達成 ・透水係数:Serrata粘土を除いて目標(5E-11<K<1E-10)の透水係数を得る ・膨潤圧:MX-80のみ膨潤圧を発生し、他2種については顕著な膨潤圧は発生しない ・透気係数:クニゲルは、比較的低い飽和度において-14乗、Serrata粘土は、飽和度により-15~-16乗の透気性 ・総括:同一の締めめ方法で最も高い乾燥密度と低透水性を示すクニゲルVIを選定	・乾燥試験体と完全飽和試験体の重量の差は約0.7% (含水率変化2%相当)であり、したがって含水率の値が小さい場合でも、コンクリート中の含水率の変化を検知することが可能である	・各種計測機器が充填材中で正常に動作することを確認 ・光ファイバセンサについては、飽和度の変化を検知したものの定量的評価には至っていない	・乾燥試験体と完全飽和試験体の重量の差は約0.7% (含水率変化2%相当)であり、したがって含水率の値が小さい場合でも、コンクリート中の含水率の変化を検知することが可能である	・充填材とコンクリートライナー、コンクリートライナーと鋼ライナーとの間に主要な移行経路を確認 ・計測器、TDR、ヒートメーター、ケーブルの周りに移行経路を確認 ・原位置試験での使用を予定している計測装置の適用性が確認でき、ロッド状TDRではシーリング向上の必要性があることが判明した ・界面に形成された水みちの影響で、充填材の飽和に要する時間は推定できなかった ・充填材はほぼ飽和状態であったが、膨潤の程度は想定以下であった。	・原位置密度試験 ・湿度密度平均値:1.86g/cm ³ ・乾燥密度の変動は小さい ・類似試験結果との比較によると、充填材の透水係数は10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹¹ m/sと推定 室内分析 ・原位置より採取された試験体の含水率および砂の含有率の平均値はそれぞれ、9.9%、および77.8%となった ・施工時の深度方向の相関関係は無く、高均質性を示す	・充填材の飽和、および、試験の均質性、含水比等の確認のため、室内分析を実施

Table 5.14 室内試驗概要總括表 (2/2)

試験名称	コンクリート配合試験		TDRに関する室内試験	高飽和キャリブレーション	長期飽和試験	ペントナイト充填材
	その(1)	その(2)				
試験目的	GMT コンクリートサイロに適用する適切なコンクリートの配合の設定	基準配合に基づいたコンクリートブロックの熱特性等の把握	静的キャリブレーション ペントナイト充填材及びコンクリートの飽和度を把握するための TDR キャリブレーション特性の取得	高飽和域での TDR の動的キャリブレーション特性の把握、静的結果との比較	一定条件下における全応力の变化の測定、および全応力計の設置方法の検証	力学連成二相流データ取得試験 力学連成二相流データ取得の把握
試験概要	文献調査、および室内配合試験により以下の項目を実施 ・現地(スライズ)で人手可能な材料及びそれを利用したコンクリートの基本特性に関する文献調査(圧縮強度・材料引張強度・圧縮弾性係数・弾性係数・低発熱等) ・コンクリートの製作およびサイロの施工計画検討	・基準配合に基づき、施工配合を設定、コンクリートブロック(W1.0m×D1.0m×H0.5m)を製作し、温度試験と硬化コンクリート特性を確認 ・試験結果(発熱性状、張強度、線膨張係数、自己収縮等)に基づきサイロの温度応力解析を実施	飽和度の算出のための TDR 計測器について、以下に 2 種類のキャリブレーション試験を実施 ・室内試験 各種液体(誘電率既知)を用いたフロー特性決定のための室内キャリブレーション ・原位置試験(GTS) 誘電率と含水率の関係を示すためにするための原位置(GTS)におけるキャリブレーション 別途 TDR の長期モニタリングを実施	(2002 年 3 月より飽和を開始し、原位置よりダイレクタにデータを取得する自動計測を実施、現在計測を継続中)	鉛直方向に全応力計を設置する方法の検証と、充てん材の巨視的、微視的な特性の取得	土質特性試験 ・充てん材の初期特性を取得。 ・電子顕微鏡写真と水銀圧入による細孔径分布測定試験による、充てん材の巨視的、微視的な特性の取得。 ・GMT 実験と同一の充てん材、施工方法、同レベルの規模における圧力配向が小さい条件下での飽和過程のデータ、飽和に伴う最終的な膨脹圧力データを取得。
得られた成果	配合試験 試験配合を設定し、各々の試験結果より、本試験用の基準配合を設定した。 施工計画 コンクリートの製造、鉄筋上、型枠工、輸送・打設、打継ぎおよび養生等を含めたコンクリートサイロの施工計画を立案した。	温度計測試験 ・コンクリートブロック中心における無応力歪の計測結果より、コンクリートの線膨張係数は約 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と推定された。 ・自己収縮歪の最大値は 90×10^{-6} であった。 硬化コンクリート特性：硬化コンクリート試験の結果、28 日材令における日標圧縮強度 ($\geq 30\text{MPa}$)、および固有透過係数 ($10 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$) を満足した。 温度応力解析：最小ひび割れ指数はコンクリートサイロ全域で 2.0 以上となり、温度・自己収縮に伴うひび割れ発生の可能性は非常に低いと判断された。	室内試験 ・誘電率が既知の空気、油、グレースリン、イソプロパノールの広達時間と誘電率の関係からフロー特性を取得。 ・GMT と同一配合のコンクリート円筒型供試体(直径 105mm、長さ 71cm)を作製、特性曲線を取得。 原位置試験(GTS)：原位置において、実施工の手順で充填材を設置し、含水率パラメータとした特性曲線を取得。 TDR 長期計測：一定条件下に 2 本の TDR を配置、長期計測を実施中	(2002 年 3 月より飽和を開始し、原位置よりダイレクタにデータを取得する自動計測を実施、現在計測を継続中)	・鉛直方向に全応力計を設置する方法の検証と、充てん材の巨視的、微視的な特性の取得。 ・GMT 実験と同一の充てん材、施工方法、同レベルの規模における圧力配向が小さい条件下での飽和過程のデータ、飽和に伴う最終的な膨脹圧力データを取得。 ・最大圧力(膨潤圧)は、設置時から約 1 年後で約 0.8bar と、安定状態に達している。	土質特性試験 ・充てん材の初期特性を取得。 ・電子顕微鏡写真と水銀圧入による細孔径分布測定試験による、充てん材の巨視的、微視的な特性の取得。 ・GMT 実験と同一の充てん材、施工方法、同レベルの規模における圧力配向が小さい条件下での飽和過程のデータ、飽和に伴う最終的な膨脹圧力データを取得。 ・多段階圧接せん断試験の結果、総摩擦角も乾燥によってわずかに増大した。

5.3.2 力学連成二相流データ取得試験

ベントナイト／砂の水およびガスの移行特性を評価する目的で各種の室内試験を行っている。特に空隙構造およびその力学影響を知ることにより水－ガス連成の二相流データおよびガス－水の力学連成二相流データを取得し、力学連成解析モデルに資する。

まず、走査型電子顕微鏡観察結果を Figure 5.24 に示す。また、飽和～乾燥過程による細孔径分布の変化を水銀圧入間隙測定により計測した (Figure 5.25 参照)。飽和 → 乾燥履歴を経ることで、空隙構造の変化（マクロポアの減少、ミクロポアの増加）が起こっている。この現象を裏付けるように、透気特性の変化（透気係数減少）が計測されている（

Figure 5.26 参照）。ただし、このデータでは空隙率自体も飽和～乾燥過程で変化しているため、厳密に体積保存された状態で飽和～乾燥過程によって変化するかは、今後の検討を要する。

さらに、サクシオンを制御した、oedometer 試験、三軸試験、一面せん断試験による力学特性、水分特性、不飽和透水特性を室内試験より得た (Figure 5.27 参照)。一連の実験からベントナイト／砂混合土が、飽和～乾燥過程で細孔径を変化させ、透気性が細孔径に依存することが判明した。

これらデータは、二相流および二相流力学連成解析の入力値として用いる。

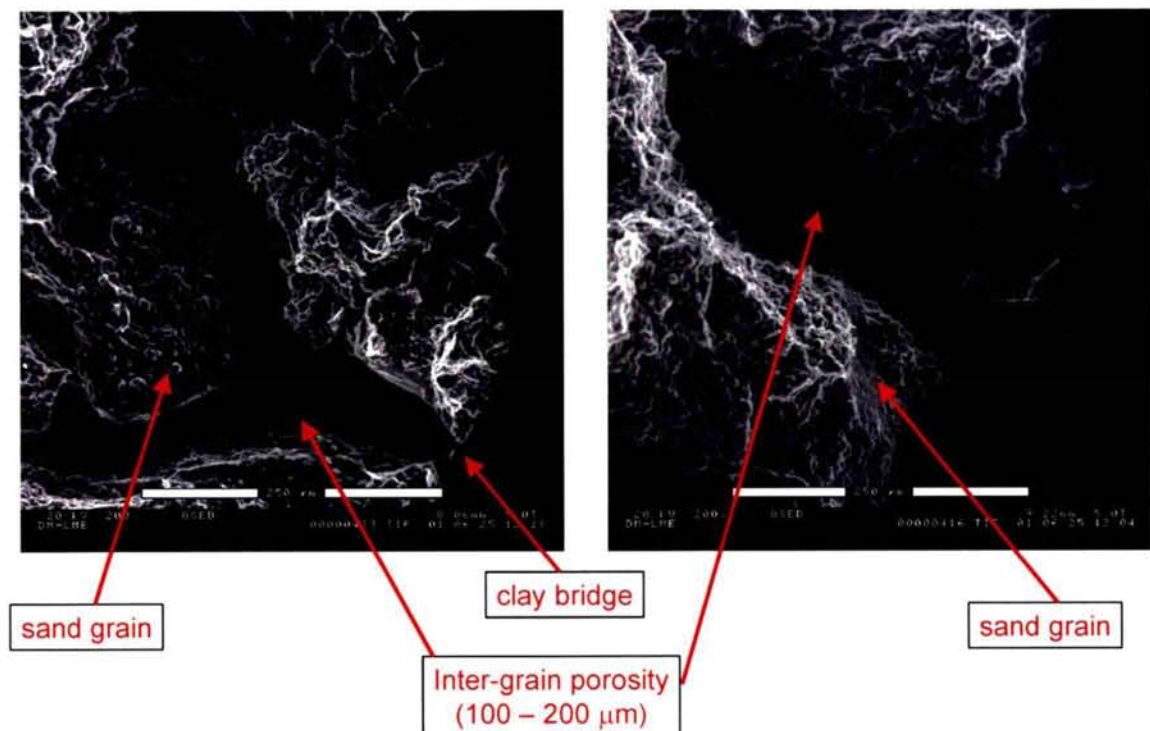


Figure 5.24 走査型電子顕微鏡観察：GMT 充填材締固め直後（含水比 11%）

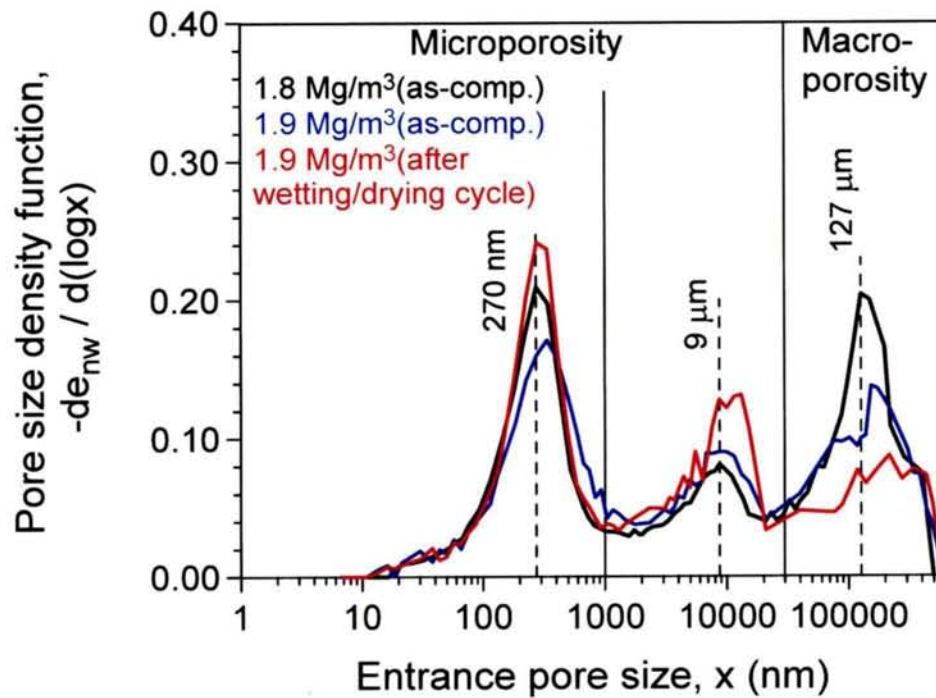


Figure 5.25 水銀圧入間隙測定 (→湿潤→乾燥履歴後) 間隙構造変化 透気・透水特性の変化

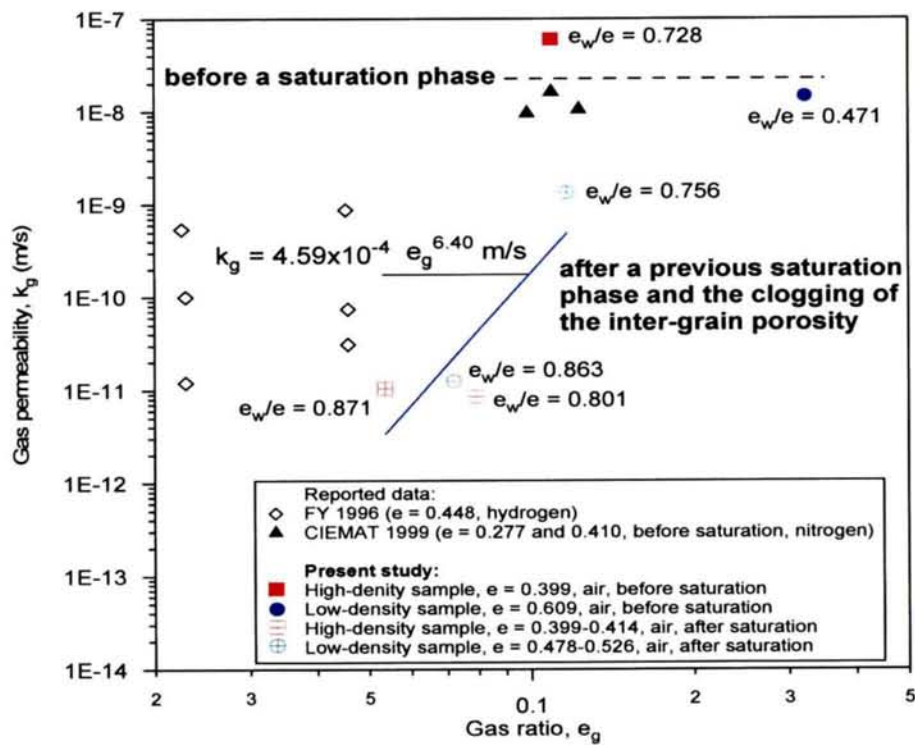


Figure 5.26 透気係数測定

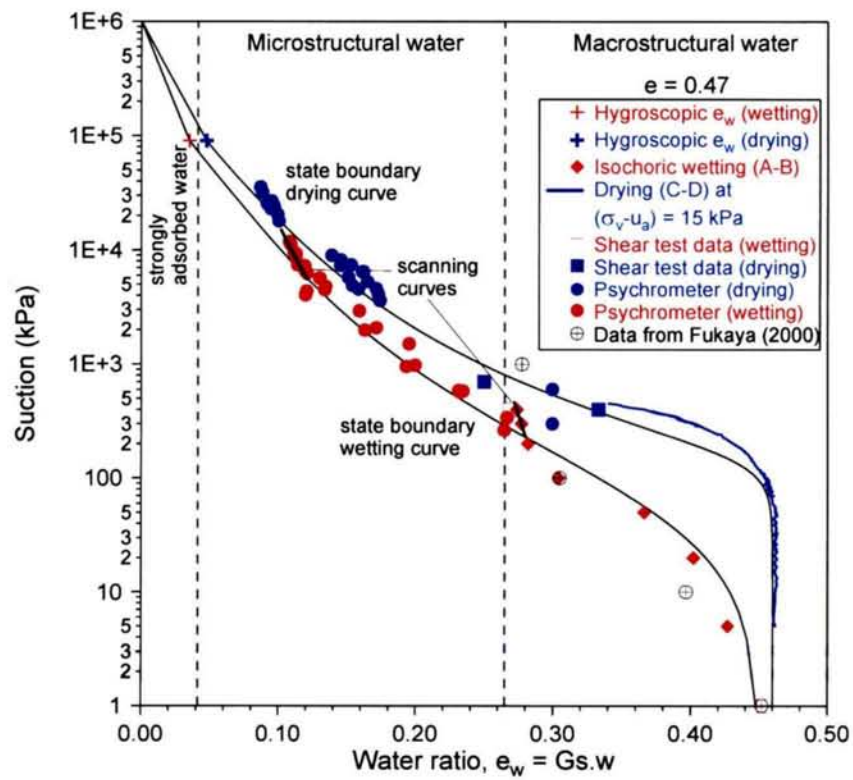


Figure 5.27 水分特性曲線（テンシオメーター、サイクロメーター、サクシオン制御試験）

5.4 ガス移行挙動評価解析

5.4.1 ガス移行挙動概念

本試験における解析の目的は、大きく2つに分けられる。第1は、本試験の目的としてあげている“ガス移行に適用できるモデルの評価／検討”、第2は“本試験の計画立案および見直し”が挙げられる。

まず、検討に当たり概念モデルとして、Figure 5.28 の示す2種類の概念を考慮した。これは、Figure 5.29 に示す室内試験の結果からも両概念の可能性が示されている。第1の概念は、ガスが土中の地下水と同様に均一に移行する概念であり、もう一方はガスが選択経路のみを移行する概念である。選択経路をガスが移行する理由としては、細孔径分布のうち大きな径路をガスが見つけれ流れるか、あるいは力学的にガスが空隙を押し広げる形で流れるかが想定される。これは、1)人工バリアが不飽和状態から飽和への過程（人工飽和）と2)飽和状態からガスが移行する不飽和への過程においても異なる可能性がある。

5.4.2 数種の解析の比較と問題点の整理

そこで、本試験では、国内外の専門家と協力して、これら一連の解析及びガス移行に関するモデルの適用性評価を、複数の二相流解析コード（TOUGH2、GETFLOWS、CODE BRIGHT、ROCK FLOW、Merilen、Table 5.15 参照）により行うこととした。5コードの内、CODE BRIGHT、Merilen は、ガス移行概念に力学連成を導入することのできるコードであり、残りは汎用性の高い通常の二相流解析コードである。

具体的には、1)各解析コードの比較、2)ガス移行挙動の予測、3)実験後の解体調査結果を反映した再解析の3ステップに分けられる。今回は、2)および3)については、検討が進行中であるため、1)について概略比較する。

各解析コードの適用性を比較するため、同一の条件（サイロ上部の空洞から500kPaで加圧注水し、約180日後の結果で比較）で、人工バリアの飽和挙動に関する予測解析を実施した。Figure 5.30 に示すように、4種類の解析コードにおいて、ほぼ同様の結果が得られた。

Table 5.15 解析コード一覧

コード名	Code-BRIGHT	Mehrlin	ROCKFLOW	TOUGH2
国名	スペイン	スイス	ドイツ	アメリカ
解析方法	有限要素法	有限要素法	有限要素法	差分法
次元数	三次元	三次元	三次元	三次元

5.4.3 本試験の計画立案および見直しのための解析

ここでは、計画立案のための予測解析、試験経過の評価・確認及び、事後評価の一連の解析を実施する。特に、試験期間を左右する計画立案については、最新の情報を基に解析を行っている。また、解析コードは、信頼性が高く、一般的に受け入れられ、解析時間が比較的短くパラメータの扱いが容易なコードとして、多孔質媒体における二相流解析コードで最も実績のある TOUGH2 を用いることとした。

これを受け、人工飽和の詳細な計画には、1)計画立案時に既存の二相流データを用いた解析、2)岩盤の透水性、透気性データの取得 (5. (2)および(3)) と岩盤壁面からの湧水 (5.2.2 (4) 空洞全体の湧水量計測参照) の結果を受けての解析、3)人工バリア構築に伴うデータ取得(5.2.3 (1) コンクリートサイロの施工 5.2.3 (2) 充てん材の施工)を基にした解析、さらには、人工飽和の原位置データを基にした逆解析 (ITOUGH2 使用)、4)人工飽和に要する期間検討の解析 (Figure 5.31 に解析と測定結果の比較を示す)、5)飽和後のガス移行予測解析、6)原位置試験終了後の評価のための解析が挙げられる。

例えば、注水方法の違い、飽和に要する時間等の検討を行った結果、岩盤からの湧水のみでは、人工バリアの飽和に長時間を必要とするため、サイロ上部の空洞から 500kPa で加圧注水することとした。これにより加圧注水後約 300 日程度で飽和に達する予定である。

Table 5.16 解析に使用する水及びガスの特性値 STP ($T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_0=0.1013\text{ MPa}$)

Property	Liquid (water)	Gas (nitrogen)	Source
Density, ρ_a	998.1 kg/m ³	————	Fredlund and Rahardjo (1993)
Compressibility, b	$4.524 \times 10^{-4}\text{ MPa}^{-1}$	————	
Dynamic viscosity	$1.009 \times 10^{-9}\text{ MPa s}$	$1.785 \times 10^{-11}\text{ MPa s}$	
Molecular diffusion coefficient	————	$2.2 \times 10^{-9}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$	
Molar mass, M_a	0.018 kg mol ⁻¹	0.02895 kg mol ⁻¹	de Marsily (1986)
Henry's constant, H		10000 Mpa	Philip Bromberg (1984)

$a=1$ (水)または g (ガス)、 $D_f=0$ (分散を 0 と仮定)、かつ屈曲率 = 1 とする。

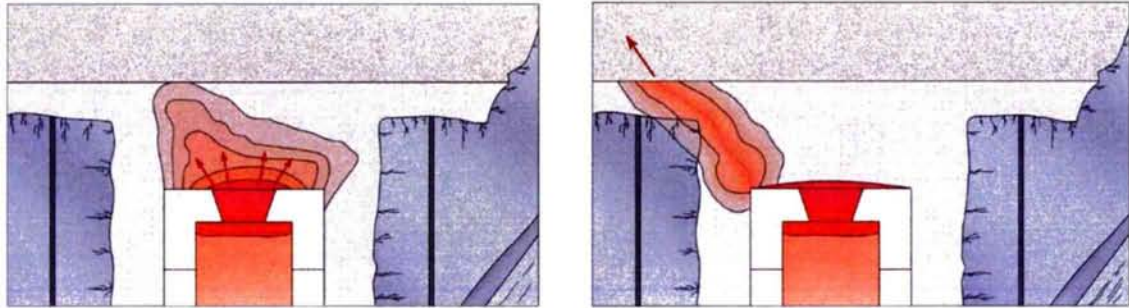


Figure 5.28 本試験で想定しているガス移行概念



選択経路をガスが移行、トレーサーが発色

Figure 5.29 2種類のガス移行概念を示す室内試験結果

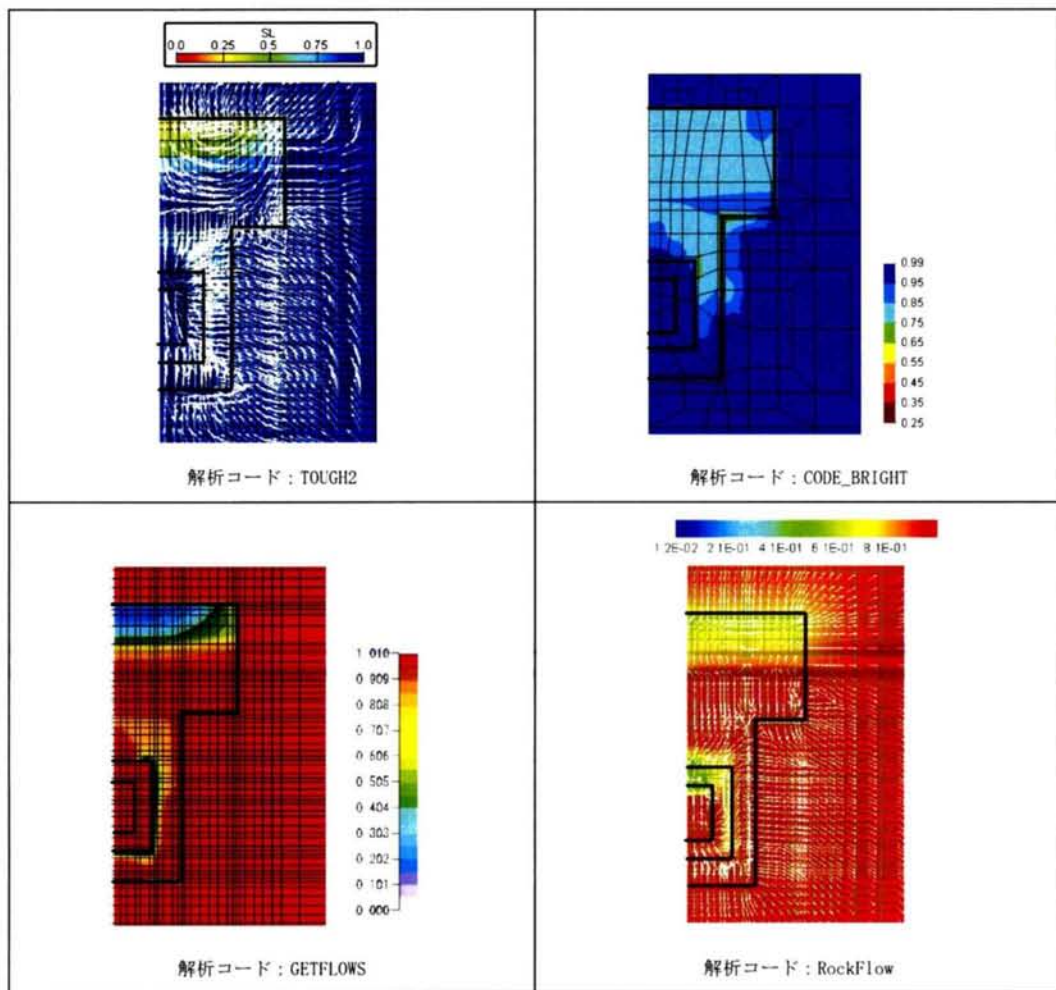


Figure 5.30 4種類のガス移行解析コードによる人工飽和（再冠水）状況の解析結果

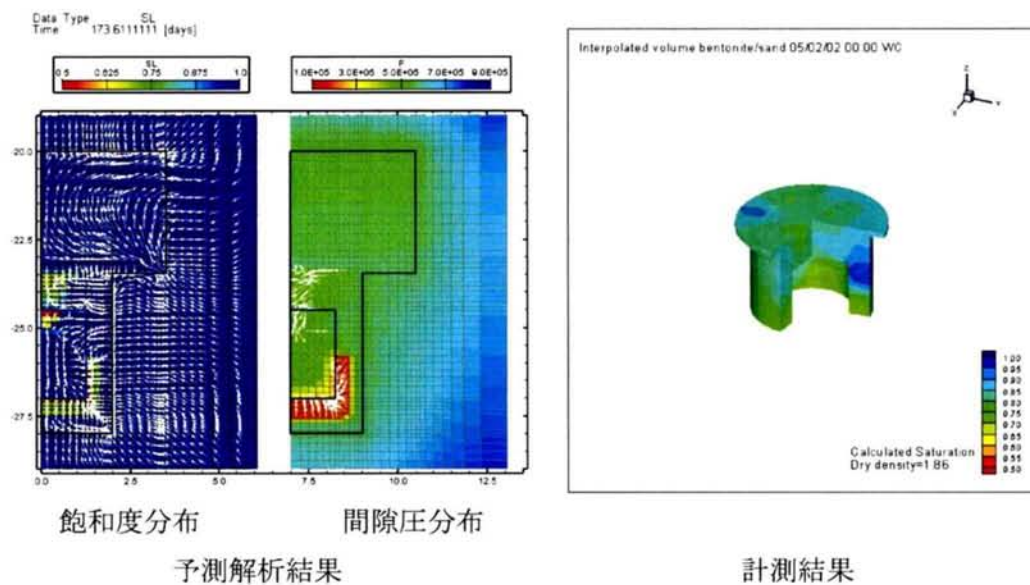


Figure 5.31 TOUGH2 による予測解析と原位置試験との比較

5.5 まとめ

室内試験により、人工バリア材料の選定、解析に必要なパラメータの取得を行い、これらのデータを基にした予測解析結果を行い、試験計画の見直し及び試験の管理を行っている。原位置では、人工バリアの飽和及び解析的検討を行った。

これまでの各試験より得られた成果を示すと、

天然バリア：

- ・空洞への湧水量は、約 5 ㎥/日で、施工上問題とはならない。
- ・約 5 ㎥/日は、試験システムの飽和を試験期間中に終了させることは、困難であり、別途飽和を加速させるシステムが必要である（人工飽和のシステムの導入）。
- ・境界条件は、間隙水圧測定を行い、設定可能である。
- ・岩盤のモデル化に必要な物性値は、ガスエントリー圧を含め取得されている。

人工バリアの建設：

- ・転圧時間及び撤出し厚と転圧後の層厚によって、施工管理が可能であることが確認された。
- ・幅 75cm 高さ 4.5m の狭空間において、設定した品質の基で施工が行なえることが確認された。
- ・施工中に充てん材の締固め直後に各層を対象に 50 点以上の密度測定を実施し品質管理を行なった。ただし、施工後の 4m 以上の高さ方向密度分布がどうかは現段階で不明である。これについては、解体試験において明らかにしていく予定である。
- ・コンクリートサイロの底盤を打設する際、底部ベントナイト上に直接打設することが出来ないため、何らかの養生が必要である。
- ・岩盤及びコンクリートとの境界付近での充てん材の締固めを今回は手作業で行なった。しかし、実規模の処分場を想定した場合、その規模から手作業では困難と考えられ、施工法あるいはモデル上で何らかの対応を考える必要がある。
- ・周辺岩盤から流入する湧水に対し、底盤にグラベル層を設置し集水し、ポンプによって排水した。しかし、実規模で底盤に充てん材を設置する必要がある場合、岩盤からの湧水に対する処置が必要となる。

解析：

- ・複数の解析コードで検討を進め、再飽和の挙動に関しては、各コードで同様の結果が得られることが確認された。
- ・試験の計画立案・見直しに予測解析を行い、成果を反映している。

参考文献

- de Marsily, G. (1986) Quantitative Hydrogeology for Engineers. San Diego. Academic Press Inc
- European Commission: EUR16235EN Modelling and Experiments on GAS migration in repository host rock (MEGAS), 1995
- European Commission: EUR17557EN European Validation Exercise of GAS migration models through geological media (EVEGAS), 1997
- European Commission-Nuclear Energy Agency: EUR 19122- Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste, 1999
- Fredlund, D.G. and H. Rahardjo (1993) Soil Mechanics for Unsaturated Soils. Wiley Inter-science. New York
- Fujiwara, A., Yasutomi, I., Ando, Y., Vomvoris, S., Fukaya, M., Marschall, P., Kickmaier, W. and Ando, K. (1998) : GMT - Large Scale In-Situ Testing of the Gas Migration Properties of Engineered Barriers, Proc. 5th Int. WS. on Key Issues in Waste Isolation Research, Barcelona.
- Vomvoris, S., Marschall, P., Kickmaier, W., Ando, K., Fukaya, M., Fujiwara, A. and Kaku, K. (1998): GMT - A Large Scale In-Situ Test of the Gas Migration Properties of Engineered Barriers, Proc. 22nd Int. Symp. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXI, MRS' 98.
- Vomvoris, S., Fujiwara, A., Ando, K. and K. Kaku (2001): Gas Migration in the Engineered Barrier System: The GMT Large-Scale In-Situ Test in the Grimsel Test Site, Proc. 9th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conference (to be Held in April 29 - May 3; 2001, Expected Publication in Summer, 2001).
- K. Ando, A. Fujiwara, S. Tokuyama, T. Adachi, T. Saeki, S. Vomvoris, K. Fukudome, A. Shimmura "TOTAL SYSTEM EVALUATION OF GAS GENERATION AND MIGRATION IN THE RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY" GLOBAL2001, September 2001
- K. Ando, T. Adachi, A. Fujiwara, S. Vomvoris, W. Kickmaier, S. Yamamoto, A. Shimmura, "BACKFILLING FOR SILO-TYPE REPOSITORY UNDER REALISTIC CONDITIONS: THE GAS MIGRATION TEST (GMT) AT THE GRIMSEL TEST SITE" 6th International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, March 2002

第6章 今後の展開

6.1 調査・評価のデータフローダイアグラム

第2章における調査評価のデータフローダイアグラムにおいては、技術者の知見を基に構築したため、その信頼性を確認する必要がある。これは、調査から評価の一連の作業を仮想データにより模擬検討することでデータフローダイアグラムの信頼性を向上することができる。また、データフローダイアグラムにより技術開発の必要な調査、評価手法について洗い出しを行うとともに、開発された技術の評価への寄与度についても評価を行うことが重要となる。これには、必要となるデータに対する各々の寄与率を設定し、不確実性評価を行うことで開発された技術の評価が可能となる。結果として、信頼性の高いデータフローダイアグラムにより技術者の思考をよりわかりやすく、かつ追跡性の高い情報として整理することが可能となる。

6.2 確率論を用いた物質移行場の連続体的アプローチ

第3章で提案した確率論的手法をより精度を上げる方法として、トンネルへの湧水量や水頭を含めたクリギング手法（コバリオグラムの利用）（Gómez-Hernández *et al.*, 1997, 2000）やこれらを条件付きで解析する方法、あるいはトレーサー試験を逆解析する手法（Gómez-Hernández *et al.*, 2002）についても可能であると考える。今回取得された透水係数のデータが相関係数の観点から不足しているため、検討できなかった3次元解析への適用性も含めて研究を行っていく予定である。また、調査への提言という観点から、確率論的手法の特徴として次ステップの計測計画を立案する際に、最も確率論的に望ましい点を示すことができる特徴を活かして、全体の不確実性を最小にする次の計測点を示すアプローチの適用性についても研究を進める予定である。

6.3 亀裂性岩盤における物質移行特性評価

第4章で提案した手法については、第5章のガス移行挙動評価への適用性検討を行うことを考えている。これは、ガス移行挙動において、ブレイクスループレッシャーおよび間隙率が対象スケールに依存し、不均質性に伴うガス移行挙動の特徴（例えば、フィンガリング）を評価する上で既存のプログラムで対応できないためである。

6.4 人工構造物及びその周辺岩盤の物質移行（ガス）に関する実験的評価

(1) 原位置試験における展開

人工バリアの飽和を現在終了し、平成 15 年 3 月現在、ガス注入を進行中である。ガスの移行試験終了後は、試験体を解体・調査し、ガスの移行経路を確認するとともに、試験体の材料特性、施工の品質及び計測機器の測定精度、充てん材の不均質性及び充てん材とコンクリートサイロ及び周辺岩盤との境界面の特性等の評価・確認を行い試験結果の信頼性を向上させる。

(2) ガス移行挙動解析

ガス移行挙動評価において、ベントナイト／砂混合系材料そのものの不均質性、可塑性や膨潤性及び比較的低下圧で生じるブレイクスルー現象とその発生後の卓越流路を主流とする選択的流れ等のため、ガスの透過現象がダルシー二相流で必ずしも表現できないとの見解が出されている。特に細孔径分布における不可逆挙動を考慮し、ベントナイト／砂混合系材料の細孔径と毛管圧の関係を導入したパイプモデルの評価手法によりキャピラリバンドルモデル（以下 C B モデル）を改良、ガス移行挙動の評価の提案を行う。

(3) キャピラリバンドルモデル

MEGAS Project (Modeling and Experiments on Gas Migration in Repository Host Rocks) (CEN・SCK, 1990-1994) 11) で開発され、Boom Clay を対象としたガス移行モデルの 1 つとして採用されているのがキャピラーバンドルモデル (CB モデル) である。飽和した Boom Clay に対し REV (Representative Elementary Volume : 代表要素容積) に基づくダルシーモデルは定常の場合は有効であるが、非定常には適用が難しいと考えられ、また REV モデルを用いたガス移行モデルへの適用は原理的に現在多くの議論があるため、MEGAS では非定常かつ定常挙動を説明でき、卓越流路 (Preferential Pathway) にも適用可能なガス移行モデル (CB モデル) を開発した 21)。彼らのモデルでは、基本的には、Figure 6.1 に示すように交差するキャピラリ (毛管) がないコアを考え、各毛管は均質 (Uniform) であり、独立した半径 r を有していると仮定している。

それぞれの毛管を独立した半径を持つ均質なものと仮定すると、空隙と毛管の関係は、以下の式で評価される。

$$\phi_g(t) = \sum \left(\frac{P_g}{\tau \cdot L} \cdot \frac{\pi r_i^4}{8\mu_g} \cdot t \right) \cdot N_i \quad (6-1)$$

ここに、

P_g :ガス圧, τ :屈曲率, L :供試体厚, r_i :細孔半径, μ_g :ガスの粘性係数, t :時間,

N_i :細孔本数

この場合、半径 r の設定により、種々の飽和度において気液界面が形成される細孔半径が得られ、飽和度に対する毛管圧を求めることが可能となる。すなわち、ベントナイト／砂混合系材料の細孔組織中において、液状水と気体が共存し平衡状態にある時、毛管に存在する水の毛管圧は、細孔半径 r_s を用いて式()により求めることが出来る。

$$P = \frac{2 \cdot \gamma}{r_s}$$

ここで、 γ :液体の表面張力 (N/m)

P :毛管圧 (Pa)

平衡状態では、細孔組織中において、その半径が式(4-4-13)により規定される半径 r_s (m) より小さい部分はすべて液状水により満たされているとし、半径 r_s (m) 以上の細孔組織がガス透過経路と考えられる。

この関係を確率論的展開を行った3章の基礎方程式と組み合わせることにより、フィンガリング等の特異な挙動をマクロな観点から評価する予定である。

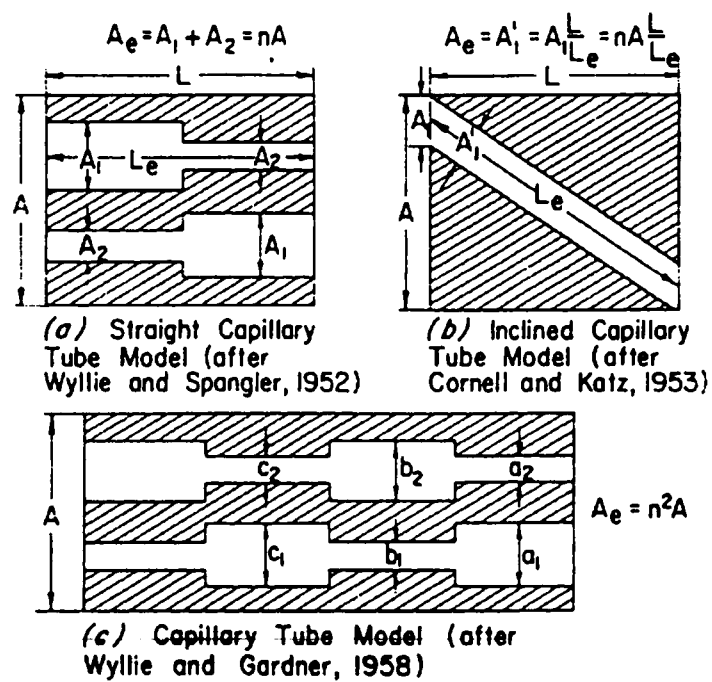


Figure 6.1 多孔質媒体における流路長のモデル例

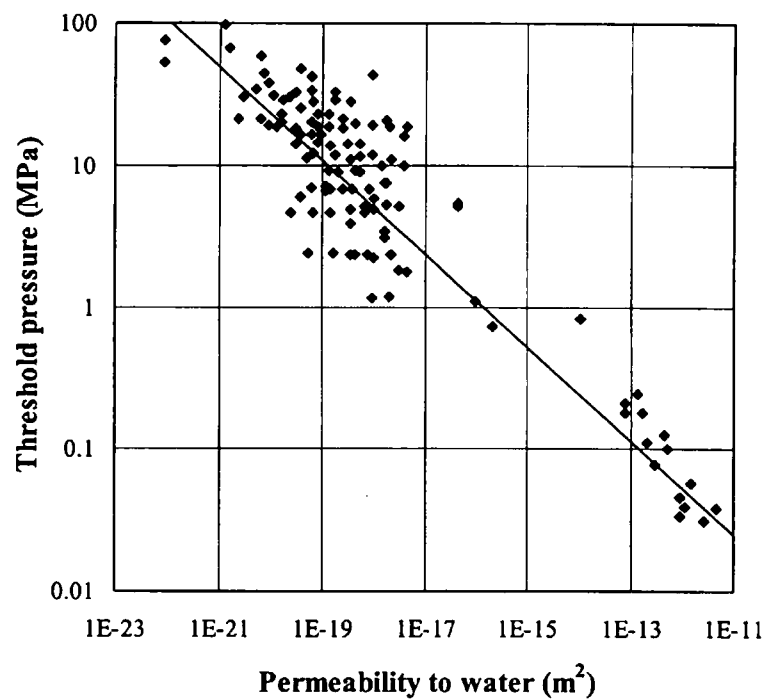


Figure 6.2 透水性とガスブレイクスループレッシャーの関係

第7章 まとめ

第2章では、調査で得られる情報と評価に必要な情報を整理し、データフローダイアグラムとして、その連関を設定した。このデータフローダイアグラムは、3章以降の研究の位置づけを明確化する上でも重要な整理となった。さらに、例題的にボーリング孔による透水係数測定と地下水流動評価について、具体的にその連関を示し、①数キロオーダーのランダムな水理場を想定すると透水係数の計測数はある程度の数（今回の検討では20測点程度）からその信頼性はあまり向上しないこと、②ある領域を地下水流動解析する場合、対象とする領域の1/5～1/10の領域より大きい特性を持った要素がある場合、均質なモデルとして扱うことに誤差が生じる。例えば、100mを対象とした地下水流動場において、10m～20mより大きい割れ目など高透水ゾーンが存在する場合、モデル評価上無視することで大きな誤差が生じる危険性がある、③ある領域をモデル化する場合、そこが空間的に相関を持たないランダム場であれば、地下水流動上は10分割以上で均質場としてモデル化できる、等の知見を得ることが出来た。

第3章では、連続体モデルによる地下水流動および物質移行の確率論的評価を行っている。具体的には、地下水の流れを把握することの困難が予想される亀裂性岩盤を対象とし、透水試験結果の内1/3が計測下限値以下の原位置透水係数データをもとにクリギング手法の一つであるしたモンテカルロ法によるインディケータコンディショナルシミュレーションにより、確率論的に等しい（平均、分散の等しい）100ケースのFEMの要素イメージを単位とした高いレゾリューション（分解能）の水理場をモデル化し、さらに水頭についてはトレンドを考慮して2次の残差方程式よりクリギングを用いて境界条件を設定することにより浸透流解析を行い、実測の水頭および調査トンネルへの湧水量を比較し、良好な一致を見た。

さらに、物質移行を評価するために原位置で実施されたトレーサ試験を解析的に評価した。評価に当たっては、上述の100個の水理場から原位置で得られたトンネルへの湧水量と最も近い水理場を選定し、4トレーサ試験に対して解析を行い、原位置で計測されたブレイクスルーカーブと比較を行い、有効間隙率および縦方向、横方向分散長を推定した。これらのデータを用いて原位置で得られたブレイクスルーカーブを再現することが出来た。

また、本研究とは異なった割れ目系ネットワークモデルの結果と比較することで、以下の点について本手法を評価することができた。

- ① 本研究は、確率論的連続体モデルをフランスのFanay-Augères ウラン鉱山における花崗岩を対象としたトンネルでの地下水の流動および物質の移流分散に関わる原位置試験に適用、十分に信頼できる結果を得られた。これは、花崗岩のような亀裂性岩盤を対

象とした場合、割れ目ネットワークモデルのみが解析可能とする考えに対して十分反論できる結果であると考ええる。

- ② 本研究で用いた手法は、割れ目系の詳細なデータ（開口幅、形状、角度、連続性）を必要とせず、取り扱いが容易で複雑な仮定を必要としない。ここで、言う複雑な仮定とは、例えば割れ目の奥行き方向の連続性など見えない部分の仮定を言う。ただし、本研究は、連続体モデルの確証を行っているわけではなく、割れ目ネットワークモデルの結果と比較することで、効率的なモデル化により最小限の原位置情報と作業時間で割れ目ネットワークモデルのような複雑なモデルと同様な結果を得ることが出来る事を示している。

第4章では、サイト特性評価において実施される透水試験やその後に続くトレーサ試験など、一連の原位置試験・調査においての整合性評価を確率論的に行った。具体的には、物質移行を評価するための間隙率（地下水量）は、割れ目の大きさや表面の不均質性から透水性から求まる間隙率（並行平板モデルの開口幅あるいはパイプモデルにおけるパイプ半径から求まる）より大きくなることをパイプモデルを用いて単純に透水性から得られる有効間隙率と物質移行から得られる有効間隙率の関係を理論的に示すことに成功した。原位置あるいは岩盤のサンプルより得られる透水性に関する情報を基に物質移行の特性について定量的に評価した結果、 $n_T / n_F = \exp(3\sigma_{\ln T}^2 / 8)$ の関係を得ることに成功した。ここに、 n_T は、物質移行を評価する間隙率であり、 n_F は、透水性を評価する間隙率である。

この単純化した理論解によれば、物質の移行を考えた場合の有効間隙率は、割れ目の幅の変動、不均質性、表面の粗度等により増加することが確認された。

また、本研究は現実の単純化の仮定で発生する係数を評価したものであり、実現現象を直接評価したものでは無いが、低透水性の亀裂性岩盤における初期調査段階でトレーサ試験の実施やモデルコンセプトの構築には極めて有効であると考ええる。

第5章では、揮発性汚染物質のガス化、有機物によるガス発生あるいは還元雰囲気下での金属腐食によって発生したガスによる人工構造物へ悪影響、ガス自体が有害である可能性、ガスによる汚染物質の押し出しの可能性等、廃棄物を封じ込める上で考慮を要するこれらの現象を評価するために、信頼性のあるガスの発生量及び移行挙動の評価手法を構築し、ガスの移行挙動における多重バリアシステムの評価手法の信頼性を向上させることを目的として、処分場環境と類似した原位置条件下で模擬人工バリアと周辺の岩盤（天然バリア）を含む系でのガス移行挙動試験（Gas Migration Test：以下GMT）を行っている。

現状、室内試験により、人工バリア材料の選定、解析に必要なパラメータの取得を行い、これらのデータを基にした予測解析結果を行っている。

これまでの各試験より得られた成果および課題を中間的に示すと、

天然バリアは、湧水量測定試験、間隙水圧のモニタリング、透水透気試験等を行い、以下の岩盤性状を把握している。

- ・空洞への湧水量は、約 5 ㎥/日で、施工上問題とはならない。
- ・約 5 ㎥/日は、試験システムの飽和を試験期間中に終了させることは、困難であり、別途飽和を加速させるシステムが必要である（人工飽和のシステムの導入）。
- ・境界条件は、間隙水圧測定を行っている。

この結果、岩盤のモデル化に必要となる物性値は、ガスエントリー圧を含め取得され、モデル化する事が出来る等の結論を得た。

また、人工バリアの建設では、

- ・転圧時間及び撤出し厚と転圧後の層厚によって、施工管理が可能であることが確認された。
- ・幅 75cm 高さ 4.5m の狭空間において、設定した品質の基で施工が行なえることが確認された。
- ・施工中に充てん材の締固め直後に各層を対象に 50 点以上の密度測定を実施し品質管理を行ない、解析モデルへの入力値として不均質性も含め、評価可能なデータを取得できた。ただし、施工後の 4m 以上の高さ方向密度分布がどうかは現段階で不明である。これについては、解体試験において明らかにしていく予定である。
- ・コンクリートサイロの底盤を打設する際、底部ベントナイト上に直接打設することが出来ないため、何らかの養生が必要である。
- ・岩盤及びコンクリートとの境界付近での充てん材の締固めを今回は手作業で行なった。しかし、実規模の処分場を想定した場合、その規模から手作業では困難と考えられ、施工法あるいはモデル上で何らかの対応を考える必要がある。
- ・周辺岩盤から流入する湧水に対し、底盤にグラベル層を設置し集水し、ポンプによって排水した。しかし、実規模で底盤に充てん材を設置する必要がある場合、岩盤からの湧水に対する処置が必要となる等の結論を得た。

さらに、解析では、

- ・複数の解析コードで検討を進め、再飽和の挙動に関しては、各コードで同様の結果が得られることが確認された。
- ・水-ガス-力学連成挙動についても知見を深め、コードの適用性についても確認した。
- ・さらに、フィンガリング等のローカルな不均質性から起こる現象については、従来の解析コードでは評価できず、本研究では新たなアプローチを提案した。

謝辞

本論文は、(株)大林組の教育制度により、京都大学大学院工学研究科博士後期課程在学中に実施した研究の成果も含め、著者がこれまで関わってきた岩盤地下水中の汚染物質の環境への影響評価手法について研究した成果をまとめたものです。

本論文をまとめるに当たり、京都大学大学院工学研究科教授 大西有三先生には、研究の方向性と内容の細部に至るまで具体的にご指導を頂くとともに、(株)大林組に入社以来、全く知識の無かった岩盤地下水分野への基本的考え方について、ご指導・ご助言を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科教授 渡邊英一先生、森澤眞輔先生には、本論文の審査をお引き受け頂き、数多くのご指導、貴重なご意見を頂きました事に対して、心から感謝致します。

著者が現在在籍している原子力環境整備促進・資金管理センターの坪谷隆夫氏、藤原愛氏には、本論文をまとめるにひとかたならぬご支援を頂きました。安達哲也氏と吉村公孝氏には、研究業務において、よき理解者として多大なご協力をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

また、著者は、1992年から1994年まで米国アリゾナ州立大学大学院へ留学する機会と1996年から1998年までの2年間、スイスの放射性廃棄物処分組合(NAGRA)で働く機会を頂きました。アリゾナ大学時代の指導教官であった水文水資源学科教授 S. P. Neuman 先生には、地下水における様々な課題とそれに立ち向かう姿勢をご教示頂くとともに、NAGRAでは、地下水グループに所属し S. Vomvoris 博士の指導の基、地下水の現場での貴重な経験をさせて頂きました。ここに、深く感謝いたします。

(株)大林組での諸先輩、同僚、後輩の方々からのご指導、ご協力によりここまでこれたと感謝致します。特に、(株)大林組土木技術本部部長 河村秀紀氏、課長 武内邦文氏には留学にはじまり、様々な経験の後押しと励まし、日頃から懇切なご指導を頂き、心から感謝致します。

京都大学大学院工学研究科助教授 大津宏康、同助手 西山哲先生、大西研究室の伊藤榮利子様には、本論文提出にあたりいろいろとお世話になりました。心より御礼申し上げます。

最後に、家族として暖かく見守ってくれた妻 倫子、長女 未奈穂、長男 将大に心から感謝致します。